

UNIVERSITETET I OSLO
Fysisk Institutt

**Matematisk
modellering av
strømvtager og
kontaktledning**

Jeanette M. Sølvberg

UniK - Universitetsstudiene på
Kjeller

01. mars 2008



Forord

Denne masteroppgaven er utført ved Fysisk Institutt i studieprogrammet elektronikk og datateknologi ved Universitetet i Oslo og Universitetsstudiene på Kjeller (UniK). Masteroppgaven er avslutningen på min mastergrad med spesialisering innen studieretningen kybernetikk. Oppgaven er utført i samarbeid med Jernbaneverket.

Dette arbeidet har vært veldig lærerik og jeg har fått muligheten til å jobbe med noe jeg til daglig ikke jobber med i Jernbaneverket.

I og utenfor bedriften har jeg vært i kontakt med mange personer som har bidratt med praktisk hjelp, organisering, kontakter, kunnskap og synspunkter på arbeidet. Jeg vil få takke Johan Anton Wikander og Tore Norman Sørensen ved Jernbaneverket, som har gjort det mulig for meg å sette meg inn i denne utfordrende problemstillingen. I tillegg vil jeg rette en stor takk til min veileder Oddvar Hallingstad ved UniK, for verdifulle korrigeringer og støtte underveis. En stor takk rettes også til Lars Ottar Kvåle ved Comsol i Trondheim for den bistand han har gitt under modelleringsarbeidet i Comsol.

Avslutningsvis vil jeg takke mine foreldre og min kjære John Kristian for å ha inspirert og støttet meg gjennom hele studieprosessen.

Fetsund, februar 2008


Jeanette Mari Sølvberg

Sammendrag

Bakgrunn

Masteroppgaven omfatter modellering, simulering og analysering av kontaktkreftene mellom strømvtager WBL 88 og kontaktledningssystem 20 B. Det er gjort målinger på system 20B mellom Sarpsborg og Kornsjø med målevogn Roger 1000 som har en strømvtager av type WBL 88. Motivasjonen og bakgrunnen for modellering av dette systemet er å få en så realistisk modell som mulig, slik at den kan benyttes i studier av kraftbeltets oppførsel ved ulike toghastigheter og ved flere strømvtagere etter hverandre.

Metodikk

I denne studien er programmet Comsol benyttet som modellerings- og simuleringsverktøy. Det er laget en forenklet 3D-representasjon av kontaktledningssystemet ved hjelp av "finite element method". Strømvtageren er forenklet og er implementert ved hjelp av fire koblete differensiallikninger i Comsol. Strømvtageren ble modellert og analysert i Matlab før den ble implementert i Comsol. Følgende modeller ble laget:

- Modell med 1 strømvtager
- Modell med 2 strømvtagere (65 meter mellom strømvtagerne)
- Modell med 2 strømvtagere (30 meter mellom strømvtagerne)

Simuleringene er sammenlignet med målinger foretatt med målevogn Roger 1000. Målevognen Roger 1000 har en strømvtager av type WBL 88 og har utført målinger på strekninger med kontaktledningssystem 20 B. I tillegg er simuleringene sammenlignet med krav til kontaktkrefter, middelverdier og standardavvik gitt i teknisk regelverk.

Konklusjoner

Simuleringene av de utviklede modellene har gitt resultater som løser oppgavens problemstilling.

Innledningsvis ble det gjort simuleringer av strømvtageren i Matlab som viste at modellen var stabil og at den svingte seg inn til stasjonær tilstand ved et gitt oppløft.

Deretter ble det statiske systemet sammenlignet med nedhenget og elastisitetskurven for dette systemet. Nedhenget til kontaktledningssystemet ved stasjonær tilstand viste seg å være ca. 5,75 cm beregnet fra 0-nivå. Dette tilfredsstilte kravene i teknisk regelverk til nedheng på mellom 3,5 og 6,5 cm for dette systemet. I praksis ble dette løst ved påtrykk av 100 N i hvert hengetrådpunkt på kontaktledningen samt på utliggerne. Denne kraften ble påtrykt hver for seg. Oppløftet som ble registrert i hvert enkelt punkt ble plottet i en krav og utgjorde en kurve som blir kalt elastisitetskurven. Denne kurven viste at oppløftet på utliggerne var tilnærmet lik null. Mellom første og siste hengetråd stemte den simulerte elastisitetskurven med elastisiteten til dette systemet. Midt i spennet var elastisiteten på litt i overkant av 0,7 mm/N. Egentlig skulle oppløftet hatt en elastisitet på litt mer enn 0,2 mm/N på selve utliggerne. Nærmere studier viste at dette skyldtes for liten rotasjon av det lette direksjonsstaket (på utliggerne) rundt x-aksen samt for mye begrensninger i y-retning til kontaktpunktet mellom kontaktledningen og det lette direksjonsstaket. Det ble dessverre ikke tid til å foreta simuleringer av modellene med disse endringene implementert, men det ble laget en ny elastisitetskurve som viser hvordan elastisiteten skulle ha vært. Denne er presentert i kapittel 5.7.1.

Den transiente simuleringen bestod av simuleringer av de totale kontaktkreftene ved toghastigheter på 100, 130 og 160 km/h. Øyeblikksmålingene på utligger bekreftet det som ble registrert i forbindelse med oppløftet på utligger nevnt ovenfor. Kontaktkreftene på utliggerne var tilnærmet null mens det skulle vært på ca. 3 cm. Midt i spennet var derimot oppløftet på ca. 5 cm ved 100 km/h. Dette viste at kontaktledningen nesten blir løftet opp det tilsvarende nedhenget

på systemet. Videre ble middelerdi og standardavvik for kontaktkreftene beregnet ved passering av en strømvatager. Tilsvarende beregninger ble gjort for passering av to strømvatagere med en avstand på 65 eller 30 meter. I denne sammenligningen ble bare middelerdi og standardavvik for strømvatager 2 studert. Middelerdien og standardavviket ble sammenlignet med krav til middelerdi og standardavvik gitt i teknisk regelverk. Resultatene fra denne studien viste at middelerdien for kontaktkreftene ved passering av en strømvatager og to strømvatagere (65 meters mellomrom) ved 100 km/h holdt seg innenfor de gitte kravene. Middelerdien ved 130 og 160 km/h var lavere enn de gitte kravene. Middelerdien på kontaktkreftene ble ytterligere redusert når to strømvatagere med 30 meters mellomrom passerte. Standardavviket for kontaktkreftene var generelt noe høyt sammenlignet med målinger gjort i kapittel 3, men 1 og 2 strømvatagere med 65 meters avstand oppfylte kravene i teknisk regelverk.

Standardavviket og grenseverdiens minste middelkraft utmerket seg spesielt for 2 strømvatagere med 30 meter avstand. Standardavviket overskred kravene og grenseverdiens minste middelkraft lå langt under gitt grenseverdi. Siden grenseverdiens minste middelkraft avviker med opptil ca. 18 N ved 160 km/h vil selv forbedringer i modellen ikke kunne gi aksept for en slik avstand mellom strømvatagerne.

Avvik i modellen

Følgende avvik er registrert i modellen:

- Elastisiteten på utliggerne avvek fra elastisitetskurven for dette systemet.
- Øyeblikksmålingene på utligger og midt i spennet påviste ingen bølgeutbredelse i forkant av strømvatageren.
- Middelkreftene var generelt litt for lave i forhold til Jernbaneverket sine krav og i forhold til målingene presentert i kapittel 3.
- Standardavvikene holdt seg innenfor Jernbaneverkets sine krav, men var noe høye i forhold til målingene presentert i kapittel 3.

Forslag til videre arbeider

Simuleringsmodellen er ikke komplett og kan utvides på følgende områder for å kunne studere den totale samvirkning mellom kontaktleidningsnett og strømvatager:

- Utbedre modellen med utgangspunkt i de avvikene som er identifisert
- Modell for å simulere ujevnheter i sporet (kan danne grunnlag for forslag til videre arbeid – langbølger i spor)
- Modell for å simulere kurvatur
- Modell for bevegelse av togtaket (vognkassens krengeing)
- Modellere kjøreretningen på strømvatageren med åpent og lukket kne
- Programmet kan gjøres mer brukervennlig med tanke på at parametere lett kan justeres

Det kan også være interessant å se på andre system og strømvatagere enn det som er studert i denne oppgaven. Det kan utvikles en:

- Modell av kontaktleidningssystem System 20 A (Y-line) eller System 25
- Modell av et vekslingsfelt
- Modell av en annen type strømvatager

Innholdsfortegnelse

1	INNLEDNING	1
1.1	BAKGRUNN	1
1.2	HENSIKT	1
1.3	PROBLEMSTILLING	1
1.4	AVGRENSNINGER	2
1.5	FORUTSETNINGER	2
1.6	RAPPORTSTRUKTUR	2
1.7	SIMULERINGSPROGRAMMER	3
2	MEKANISK SYSTEM	4
2.1	KONTAKTLEDNINGSSYSTEMET	4
2.1.1	System 20 B	4
2.1.2	Nedheng	5
2.1.3	Sikksakk	5
2.1.4	Utligger	5
2.1.5	Parallellfelt	7
2.2	STRØMAVTAGEREN	8
2.2.1	Toppstykket	9
2.3	OPPSUMMERING AV KONTAKTLEDNINGSPARAMETERE	10
2.4	KREFTER MELLOM STRØMAVTAGER OG KONTAKTLEDNING – KONTAKTKRAFT	10
2.4.1	Statiske kriterier	11
2.4.2	Dynamiske kriterier	11
2.4.3	Middelkraft	12
2.4.4	Standardavvik	13
2.4.5	Krefter ved måling	13
3	MÅLING	15
3.1	INNLEDNING	15
3.2	ØYEBLIKSMÅLINGER	15
3.2.1	Seut blokkpost	15
3.2.2	Vestfoldbanen	16
3.3	MÅLERESULTATER I IN OFFICE	18
3.4	MÅLINGER AV KONTAKTLEDNINGSHØYDEN	19
3.5	MIDDELVERDI OG STANDARDAVVIK	20
3.6	MÅLINGER AV KONTAKTKREFTENE OG DEN VERTIKALE HASTIGHETEN	21
3.7	VIDEOOPPTAK	23
4	MODELLERING	24
4.1	UTBREDELSE AV TRANSVERSALE IMPULSER LANGS EN INNSPENT KONTAKTTRÅD	24
4.2	FINITE ELEMENT METHOD (FEM)	28
4.3	MODELLERING AV KONTAKTLEDNINGSSYSTEMET	28
4.3.1	Antagelser og forutsetninger	29
4.3.2	Teoretisk bakgrunn	29
	Beregning av massedempningsparameteren og stivhetsparameteren	29
4.3.3	Modellering av kontaktledningen som kabelelement	30
4.3.4	Modellering av utliggeren som bjelkeelementer	31
4.3.5	Modellering av sikksakk	33
4.3.6	Modellering av oppløft på utliggeren	34
4.4	MODELLERING AV STRØMAVTAGER	34
4.4.1	Antagelser og forutsetninger	34
4.4.2	Analytisk modell	35
4.4.3	Matematisk modell av strømvatager	37
4.4.4	Differensiallikningene	39
4.4.5	Ulineær modellering	41
4.4.6	Avviksmodellering	42
4.4.7	Tilstandslikningen	43
4.5	MODELLERING AV STRØMAVTAGEREN I MATLAB	44
4.6	MODELLERING AV STRØMAVTAGEREN I COMSOL	46
4.6.1	Modellering av punktkraften ved hjelp av Heavisidefunksjonen	48

4.6.2	Modellering av strømvakterne	49
4.7	MODELLERING AV FEM ELEMENTENE	49
4.8	OPPSUMMERING AV MODELLERINGEN	50
5	SIMULERING/RESULTAT	51
5.1	BAKGRUNN	51
5.2	VALG AV TOGHASTIGHET OG ANDRE PARAMETERE	51
5.3	SIMULERING AV STRØMAVTAGEREN I MATLAB	51
5.3.1	Fire koblede differensiallikninger	51
5.3.2	Seks koblede differensiallikninger	52
5.4	SIMULERING AV STRØMAVTAGEREN I COMSOL	53
5.5	SIMULERING AV KONTAKTLEDNINGEN I COMSOL	54
5.5.1	Statisk simulering	55
5.5.2	Tidsvariant simulering med matematisk modell av strømvakteren	56
5.6	BETYDNINGEN AV AVSTANDEN MELLOM TO STRØMAVTAGERE	65
5.7	SIMULERINGENS NØYAKTIGHET	67
5.7.1	Elastisiteten til kontaktledningen	68
5.7.2	Middelkraften til kontaktledningen	69
5.7.3	Fraslag	73
5.8	SAMMENLIGNING AV MÅLINGER OG SIMULERINGER	73
5.8.1	Med 1 strømvakter	73
5.9	ANIMASJON	75
5.10	SAMMENDRAG	75
6	KONKLUSJONER	76
6.1	VURDERING AV STRØMAVTAGERMODELL WBL 88	76
6.2	VURDERING AV KONTAKTLEDNINGSSYSTEM 20 B	76
6.3	VURDERING: SAMMENLIGNING AV KONTAKTKREFTENE	77
6.4	FORSLAG TIL VIDERE ARBEIDER	78
	LITTERATURLISTE	79
	APPENDIKS A	81
	SYMBOLER	81
	DEFINISJONER OG FORKORTELSER	83
	TEGNING AV NORMALUTLIGGER UTFØRELSE A OG B	85
	MODELL AV STRØMAVTAGER TYPE WBL 88	86
	KONTAKTTRÅDHEVING I VEKSLINGS- OG AVSPENNINGSFELT	87
	APPENDIKS B	92
	BEREGNING AV STASJONÆRE VERDIER	92
	APPENDIKS C	94
	BEREGNING AV ELASTISITETSKURVE	94
	BEREGNING AV MIDDELKRAFT	94
	APPENDIKS D	96
	SIMULERINGSGRUPPETER I BARTRAD/ANSYS	96
	Simulering av oppløftet til en strømvakter ved 160 km/h	96
	APPENDIKS E	97
	MÅLERESULTATER FRA INOFFICE	97
	APPENDIKS F	98
	KILDEKODEN TIL SIMULERING AV STRØMAVTAGEREN I MATLAB (M-FILEN)	98
	APPENDIKS G	112
	FORSLAG TIL MODELLERING AV PARALLELLFELT	112
	APPENDIKS H	114
	INNHOOLD PÅ DVD	114
	1. Bilder av strømvakteren WBL 88 på målevognen	114

2.	<i>Veiledning</i>	114
3.	<i>COMSOL modeller og animasjons-fil</i>	114
4.	<i>Videoopptak</i>	114
5.	<i>Rapport</i>	114

Figurliste

Figur 2-1	System 20 B uten Y-line	4
Figur 2-2	Kontaktledningssystemet	4
Figur 2-3	Sikksakk på kontaktledningen i hvert spenn	5
Figur 2-4	Normalutligger, strekkbelastet (utførelse B) og trykkbelastet (utførelse A)	6
Figur 2-5	Seksjonsfelt sett ovenfra	7
Figur 2-6	Seksjonsfelt sett fra siden	7
Figur 2-7	Strømvatager WBL 88. Sett fra siden og fra snitt A	8
Figur 2-8	Toppstykket på strømvatageren	9
Figur 2-9	Fremre og bakre slepekull	11
Figur 2-10	Middelkraft som funksjon av togfremføringshastighet	12
Figur 2-11	Største standardavvik som funksjon av togfremføringshastighet	13
Figur 2-12	Grenseverdier for middelkraft ± 3 *standardavvik som funksjon av togfremføringshastighet	14
Figur 3-1	Måling med 1 strømvatager på Seut	16
Figur 3-2	Måling med to strømvatagere på Seut	16
Figur 3-3	Måling med en strømvatager på Vestfoldbanen	17
Figur 3-4	Måling med to strømvatagere på Vestfoldbanen	17
Figur 3-5	Kraftmålinger på strekningen Sarpsborg – Kornsjø ved km 127,6-127,9. (2007)	18
Figur 3-6	Høydemåling av kontaktledningen ved 100 km/h mellom km 127,7125 – 127,7735 ..	19
Figur 3-7	Kontaktkreftene målt på strekningen Sarpsborg – Kornsjø ved ca. 100 km/h	21
Figur 3-8	Kontaktkreftene målt på strekningen Sarpsborg – Kornsjø ved ca. 130 km/h	22
Figur 3-9	Den vertikale hastigheten til kontaktledningen ved ca. 100 km/h	22
Figur 3-10	Den vertikale hastigheten til kontaktledningen ved ca. 130 km/h	22
Figur 4-1	Samvirke mellom strømvatager og kontaktledning	24
Figur 4-2	Nedheng til en line spent fast mellom to faste punkter A og B	25
Figur 4-3	Belastningen som funksjon av x , $q(x)$	25
Figur 4-4	Belastning på den spente linen	25
Figur 4-5	Kabelelementene i kontaktledningssystemet	31
Figur 4-6	Bjelkeelementene i kontaktledningssystemet	32
Figur 4-7	Strekkbelastet normalutligger	33
Figur 4-8	Trykkbelastet normalutligger	33
Figur 4-9	Sikksakk sett i xy-planet	34
Figur 4-10	Analytisk modell av strømvatageren	35
Figur 4-11	Arbeidsområdet for koblingsstag og nedre saksearm	36
Figur 4-12	Forenklet analytisk modell av strømvatageren	37
Figur 4-13	Matematisk modell av strømvatageren WBL 88	38
Figur 4-14	De absolutte kreftene som virker på masse 1 og masse 2	40
Figur 4-15	Kreftene som virker på masse 1 og 2 under avviksmøllering	42
Figur 4-16	Systemets egenverdier med fire koblede differensiallikninger	45
Figur 4-17	Systemets egenverdier med seks koblede differensiallikninger	45
Figur 4-18	Integrasjonsområdet over strømvatageren	47
Figur 4-19	Stepfunksjonen for 1 og 2 strømvatagere	48
Figur 5-1	Høydeforandringen til saksemassen (masse 1) og toppstykket (masse 2)	52
Figur 5-2	Vertikal hastighet til saksemassen (masse 1) og toppstykket (masse 2)	52
Figur 5-3	Høydeforandringen til saksemassen, toppstykket og kontaktledningen	53

Figur 5-4 Høydeforandringen til saksemassen og toppstykket	54
Figur 5-5 Kontaktledning med nedheng ved $t=0$	55
Figur 5-6 Kontaktledning med nedheng i et spenn (0-65 meter)	55
Figur 5-7 Kontaktledningens bevegelse ved strømvtagers passering (100, 130, 160 km/h).....	56
Figur 5-8 Kontaktledningens bevegelse ved to strømvtagers passering (100,130,160 km/h)...	57
Figur 5-9 Oppløftet til kl på utligger og midt i spenn 3 – en strømvtagers (100 km/h).....	58
Figur 5-10 Oppløftet til kl på utligger og midt i spenn 3 – en strømvtagers (130 km/h).....	58
Figur 5-11 Oppløftet til kl på utligger og midt i spenn 3 – en strømvtagers (160 km/h).....	58
Figur 5-12 Oppløftet til kl på utligger og midt i spennet – to strømvtagers (100 km/h).....	59
Figur 5-13 Oppløftet til kl på utligger og midt i spennet - to strømvtagers (130 km/h).....	59
Figur 5-14 Oppløftet til kl på utligger og midt i spennet – to strømvtagers (160 km/h)	60
Figur 5-15 Interaksjonskraften (f_4 og $-f_4$) fra kontaktledningen med en og to strømvtagers	61
Figur 5-16 De totale kontaktkreftene ($F_s+F_d-f_4$) mellom kontaktledningen og en strømvtagers. 62	
Figur 5-17 De totale kontaktkreftene ($F_s+F_d-f_4$) mellom kontaktledningen og to strømvtagers 63	
Figur 5-18 Den vertikale hastigheten til kl med en strømvtagers (100,130,160 km/h).....	64
Figur 5-19 Den vertikale hastigheten til kl med to strømvtagers (100,130,160 km/h).....	65
Figur 5-20 De totale kreftene ($F_s+F_d-f_4$) mellom kontaktledningen og to strømvtagers.....	66
Figur 5-21 Elastisiteten til en standard kontaktledning av type Re100, Re160, Re200 og Re250 67	
Figur 5-22 Strekkfordelingen til simulert kontaktledning i spenn 2	68
Figur 5-23 Elastisiteten til simulert kontaktledning i spenn 2	68
Figur 5-24 Elastisiteten til simulert kontaktledning i spenn 2	69
Figur 5-25 Fordeling av sum krefter ved passering av kun en strømvtagers	73
Figur 5-26 Sammenligning av målte og simulerte kontaktkrefter ved ca. 100 km/h.....	74
Figur 5-27 Sammenligning av målte og simulerte kontaktkrefter Ved ca. 130 km/h.....	74
Figur 5-28 Sammenligning av målte og simulerte vertikale hastigheter ved ca. 100 km/h.....	74
Figur 5-29 Sammenligning av målte og simulerte vertikale hastigheter ved ca. 130 km/h.....	75

Tabelliste

Tabell 2-1 Dimensjonerende verdier for strekkstag og trykkstag	7
Tabell 2-2 Elementene til strømvtagers	8
Tabell 2-3 Kontaktledningsparametere	10
Tabell 3-1 Strekningsmålinger gjort på System 20 B	15
Tabell 3-2 Kontakttrådheving i forhold til nullnivå	19
Tabell 3-3 Middelverdi og standardavvik ved 100 km/h på strekningen Sarpsborg – Kornsjø....	20
Tabell 3-4 Middelverdi og standardavvik ved 130 km/h på strekningen Sarpsborg – Kornsjø....	21
Tabell 4-1 Egenskapene til kabelelementene	31
Tabell 4-2 Egenskapene til bjelkeelementene	32
Tabell 4-3 Dempningskonstanter, fjærkonstanter, krefter og masser for WBL 88.....	38
Tabell 4-4 Konstante og variable høyder	39
Tabell 5-1 Tidspunkt ved passering av utligger 2-4 ved ulike hastigheter	51
Tabell 5-2 Krefter på strømvtagers når kun en strømvtagers passerer	70
Tabell 5-3 Krefter for strømvtagers 2 når det er 65 meter mellom strømvtagers	70
Tabell 5-4 Krefter for strømvtagers 2 når det er 30 meter mellom strømvtagers	71

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Denne oppgaven har sin opprinnelse fra en tidligere hovedoppgave utført ved NTNU av [Lyftingsmo,96]. Under videre arbeid i denne oppgaven er det foreslått at sannsynligheten for fraslag mellom kontaktledning og strømvtager kan studeres ved hjelp av en stokastisk modell.

Bakgrunnen for denne studien er at Jernbaneverket er ansvarlig for å utvikle og drive jernbanenettet slik at transportutøverne kan drive sin virksomhet effektivt og transportøkonomisk. I forbindelse med at EU er opptatt av transportpolitikk på jernbanen, stilles det krav i Europa som påvirker Norge gjennom EØS-avtalen. Jernbaneverket merker at togoperatørene ønsker å transportere tyngre laster, lengre tog samt kjøre med høyere hastigheter. I denne sammenheng er det utfordringer knyttet til togoperatørene når det gjelder kobling av lokomotiv med flere enn en strømvtager. Kraftbildet blir spesielt komplisert dersom avstanden mellom strømvtagene blir liten.

All elektrisk energi som forbrukes om bord i et elektrisk drevet lokomotiv/tog, overføres til toget i kontaktpunktet mellom kontaktråden og slepekullet på strømvtageren. Det er derfor helt avgjørende for elektrisk drift at dette kontaktpunktet fungerer optimalt. I denne sammenheng er det vesentlig at kreftene som virker i kontaktpunktet holdes innen fastsatte grenser ved aktuell fremføringshastighet av toget.

1.2 Hensikt

Hensikten med oppgaven er å studere hvordan kraftbildet endres når grunnleggende mekaniske parametere i kontaktledningsanlegg og i strømvtagere blir endret. Videre er hensikten å få innsikt i hvilke parametere som i vesentlig grad påvirker godheten når det gjelder strømvtaking.

1.3 Problemstilling

Jernbaneverket ønsker å optimalisere kontaktkreftene som eksisterer mellom strømvtageren og kontaktledningen.

Fra kontakttråden overføres det effekt til lokomotivet gjennom en strømvtager (pantograf) som befinner seg på taket av lokomotivet. Kontaktpunktet på strømvtageren er to parallelle kontaktskinner, som blant annet består av kull. Strømvtageren spennes opp mot kontakttråden ved hjelp av fjærer eller en trykkluftsyylinder og skal gi mest mulig konstant kontaktkraft. Når strømvtageren mister fullstendig kontakt med kontakttråden forsvinner primærspenningen og det skjer en utkopling av transformatoren. Dette kalles fraslag. Fraslag er uheldig fordi denne type kontakt sliter på kontaktledningen. I verste fall kan fraslag medføre neddriving av kontaktledning og ødelagte kullstifter på strømvtageren. For å minimalisere antallet fraslag er det behov for å holde kontaktkreftene mellom 10 og 150 N. Det blir slitasje på kontaktledningen, i form av perling på kontaktledningen dersom kreftene er utenfor dette området.

Forhold som kan ha betydning for kraftbeltet samt hyppighet i fraslag er blant annet variasjonen i kontaktkraft øker med hastigheten og dermed også sannsynligheten for at strømvtageren skal miste kontakten med den overhengende kontakttråden. Type strømvtager (SB10, WBL 85 eller WBL 88) samt type lokomotiv (EL16) har også betydning. For små krefter er heller ikke ønskelig da det fører til gnister og videre slitasje.

Problemet er oppdelt i følgende fire oppgaver:

- Lage en modell av kontaktledningssystemet
- Lage en modell av strømvtageren
- Simulere kreftene mellom kontaktledningen og strømvtageren
- Sammenligne simuleringsresultater med målte verdier

1.4 Avgrensninger

Oppgaven omfatter følgende:

- Strømvtagermodell av WBL 88
- Kontaktledningsanlegg av System 20 B
- Toghastigheter (100 – 160 km/h)
- Maksimalt to strømvtagere etter hverandre
- Variabel avstand mellom strømvtagerne
- Rett linje med spennlengde på 65 meter
- Vind og temperaturforhold er ikke tatt med i beregningene

1.5 Forutsetninger

Følgende forutsetninger er gjort i oppgaven:

- Statisk kraft mellom kontakttråden og slepekullet på strømvtageren er 55 N
- Ingen ujevnheter i sporet
- Måleresultater (system 20 B og WBL 88) hentes i programmet In Office
- Strømvtager og kontaktledning skal tilfredsstille krav i teknisk regelverk JD5xx
- Kontaktledningene er nøyaktig montert og godt vedlikeholdt
- Strømvtageren er godt vedlikeholdt

1.6 Rapportstruktur

Oppgaven er organisert på følgende måte:

Kapittel 2 inneholder systembeskrivelse av kontaktledningssystemet og strømvtageren. Videre er kreftene mellom strømvtageren og kontaktledningen og kravene til disse beskrevet.

Kapittel 3 viser målinger foretatt på en strekning med kontaktledningssystem 20 B og strømvtager WBL 88. Simuleringene i kapittel 5 sammenlignes videre med disse.

Kapittel 4 tar for seg modelleringen av kontaktledningssystemet og strømvtageren. Sentralt i dette kapittelet er en FEM-modell av kontaktledningssystemet og en matematisk modell av strømvtageren.

Kapittel 5 viser simuleringer gjort med den modellen som er beskrevet i kapittel 4.

I kapittel 6 er hovedkonklusjonene fra modelleringen og simulering av dette systemet oppsummert.

Appendiks A gir en oversikt over anvendte symboler samt figurer og parametere som det modellerte systemet er basert på. Appendiks B og C inneholder beregninger av stasjonære verdier, verdier for elastisitet og middelkraft. Appendiks D presenterer simuleringer gjort i programmet BARTRAD. Appendiks E inneholder måleresultater fra In Office. Appendiks F inneholder kildekode til Matlab og Comsol. Appendiks G inneholder en beskrivelse og

modellering av parallellfelt.. Appendiks H inneholder en DVD med modeller, simuleringer, veiledning, animering og videoopptak.

1.7 Simuleringsprogrammer

Følgende programmer er brukt i oppgaven:

- COMSOL Multiphysics, versjon 3.3 av 2007 er et simuleringsprogram basert på "Finite Element Method" (FEM). Programmet er brukt for å modellere kontaktledningssystemet i 3D ved hjelp av bjelkeelementer og kabelelementer. Internettadressen er www.comsol.com.
- MATLAB 7.5 Release 2007b er brukt for å modellere strømvatageren og for å visualisere resultatene når strømvatageren svinger seg inn ved til stasjonær tilstand uten å bli påvirket av kontaktledningen. Programmet er brukt for å implementere og kontrollere differensiallikningene til strømvatageren.
- In Office Roger 1000 versjon 4.0.0 av Mermec er en database som presenterer måleresultater gjort for de ulike strekninger med målevogn Roger 1000. Programmet er brukt for å finne målinger gjort for system 20 B på strekningen Sarpsborg-Kornsjø. Målingene viser blant annet følgende parametere: sikksakk, kreftene på kontaktledningen, systemhøyden, radius på kurvatur, hastighet til tog og vertikal hastighet til kontaktledning.
- EVAL 1000 versjon 4.0.0 av Mermec i 2001 er brukt for å analysere kontaktledningsmålinger gjort av målevogn Roger 1000.
- Bartrad versjon 2.49 er et program som Banverket ved Sverre Lundbeck i Bolänge i Sverige har benyttet til å beregne bæreliner og utliggere, bestemme stolpedimensjoner samt beregne forspenningskraft på fast monterte liner. Mer beskrivelse finnes i rapportene til [Lundbäck,04] og [Borg,05].

Ansys versjon 10.0 og 9.2 er et avansert beregningsprogram. Dette programmet er brukt for å gjøre simuleringer basert på beregninger gjort i Batrad. Internettadressen er www.edr.com.

2 Mekanisk system

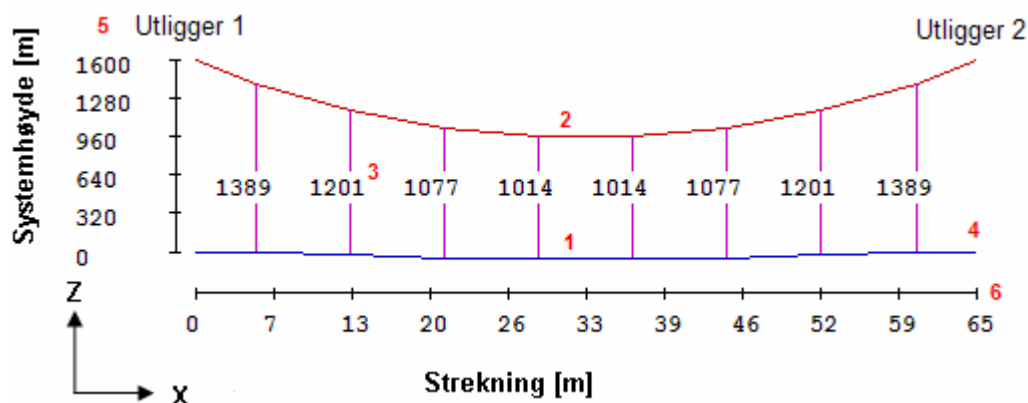
2.1 Kontaktledningssystemet

Hovedkomponentene i et kontaktledningssystem omfatter kontakttråd, bæreline, hengetråd, utligger og Y-line. I tillegg til dette er det nødvendig å nevne sikksakk og parallellfelt. Informasjon om kontaktledningssystemet er hentet fra [Teknisk regelverk,04], [Sture,93] og [Thoresen,91].

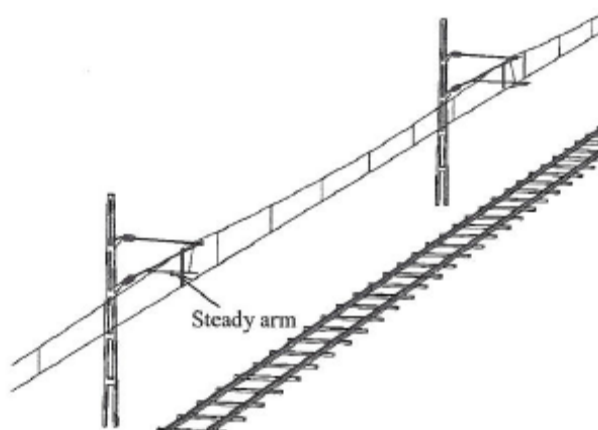
2.1.1 System 20 B

Kontaktledningssystem 20 B er bygd opp som vist i Figur 2-1 og Figur 2-2 og består ikke av Y-line. Kontaktledningssystemet består av følgende enheter:

- Kontakttråden (1) er den tråd som strømvaktakeren trykker og glir mot for å få overført elektrisk energi til å føre toget fremover.
- Hengetrådene (2) i alt åtte stykker er vertikale tråder som henger ned i fra bærelinen. Disse er festet til kontakttråden for å stabilisere kontakttrådens bevegelse i sideretningene.
- Bærelinen (3) bærer kontakttråden og er festet til kontakttråden via hengetrådene.
- Utliggerne (4) er plassert etter hver 8. hengetråd.
- Systemhøyden (5) er høyden mellom bærelinen og kontaktledningen og er maksimalt 1,6 meter.
- Spennlengden (6) er maksimalt 65 meter fra en utligger til en annen.



Figur 2-1 System 20 B uten Y-line



Figur 2-2 Kontaktledningssystemet

I [Teknisk regelverk,04] JD 540 er det krav om at maksimal spennlengde ikke skal overskride 65 meter og at systemhøyden mellom kontaktledningen og bærelinen skal være 1,6 meter på fri linje. Avstanden mellom to påfølgende hengetråder skal ikke overskride 11 meter. Disse verdiene fremkommer i Figur 2-1 og Figur 2-2.

I første omgang vil modelleringen og simuleringen ta utgangspunkt i system 20 B da dette er et enklere system å modellere. System 20 B er dimensjonert for hastigheter opp mot 160 km/h for en strømvtagger og 130 km/h for to strømvtaggere. For kontaktledningssystem med dimensjonerende hastighet under 160 km/h er det ikke krav til Y-line.

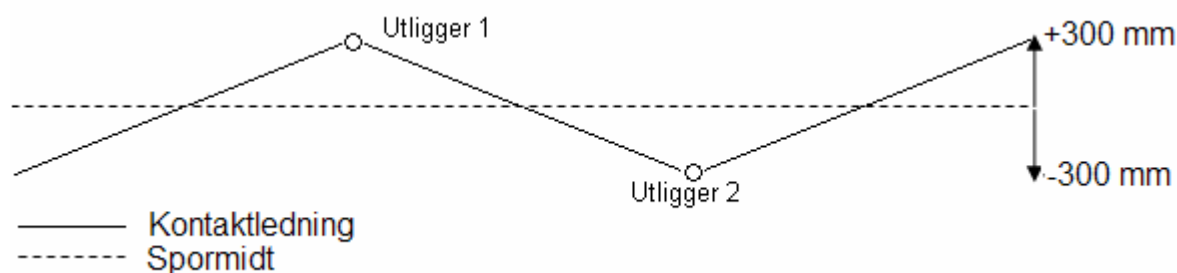
2.1.2 Nedheng

I [Teknisk regelverk,04] JD 540 er det beskrevet at det for et kontaktledningssystem med dimensjonerende hastighet opp til 200 km/h kan benyttes et nedheng på 1/1000 av spennlengden dersom tilhørende spennlengder har Y-line, og 1/2000 av spennlengden dersom tilhørende spennlengde ikke har Y-line.

I denne oppgaven blir det modellert et kontaktledningssystem uten Y-line med et spenn på 65 m. Dette innebærer at nedhenget bør være på mellom 6,5 cm og 3,25 cm.

2.1.3 Sikksakk

Kontakttråden er lagt opp med sikksakk, det vil si at kontaktledningen trekkes en bestemt avstand ut i fra spormidt for å få en mest mulig jevn slitasje på kullet.



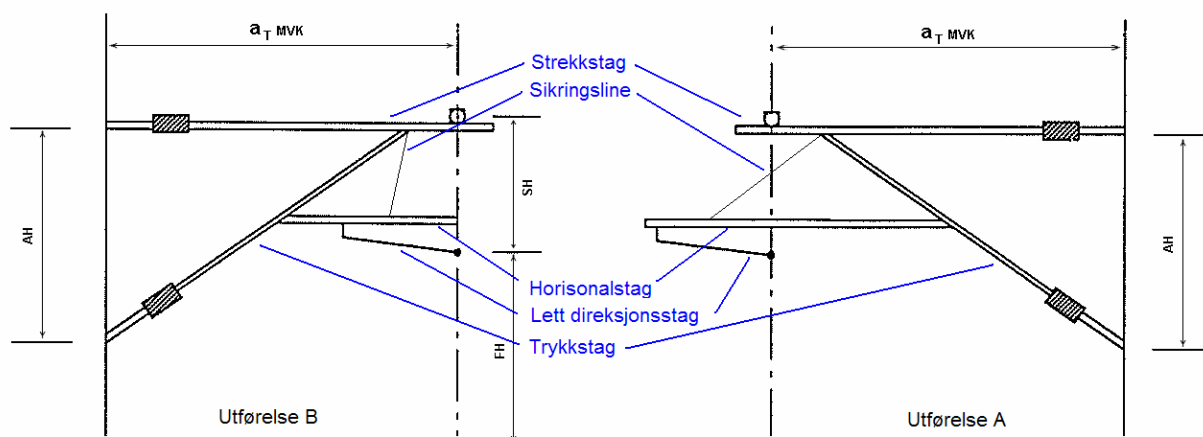
Figur 2-3 Sikksakk på kontaktledningen i hvert spenn

For kontaktledningssystem med dimensjonerende hastighet opp til 200 km/h skal det for kjørbare utliggeres nyttes sikksakk-verdi som ikke overskrider 400 mm målt ut fra en måleakse som står vinkelrett på sporplanet i spormidt.

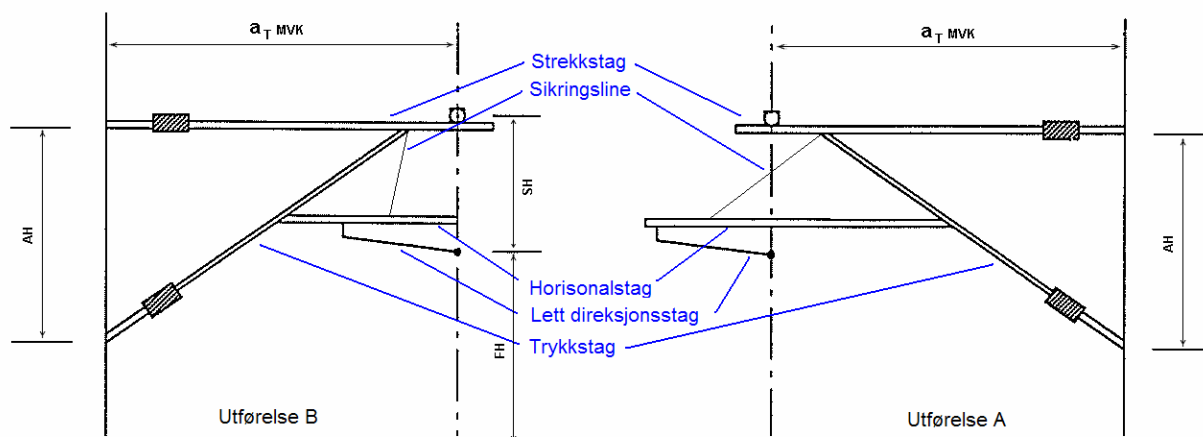
I denne oppgaven er avstanden bestemt å være 300 mm ut i fra spormidt. Det vil si at avstanden fra den ene yttersiden til den andre er 600 mm over en spennlengde på 65 meter.

2.1.4 Utligger

Utliggerer har som oppgave å bære kontaktledningsnettet og å sikre kontakttråden i dens stilling. Det skilles mellom strekkbelastet utligger og trykkbelastet utligger som vist i



Figur 2-4. Disse er plassert på samme side av sporet og det byttes annen hver gang mellom disse typene. Det er ca. 65 meter mellom to utliggere og dette utgjør spennlengden til kontaktledningen. Utliggerne består hovedsakelig av fem elementer. Det er strekkstag, trykkstag, horisontalstag, lett direksjonsstag og sikringsline.



Figur 2-4 Normalutliggere, strekkbelastet (utførelse B) og trykkbelastet (utførelse A)

I denne oppgaven skal det modelleres to strekkbelastet utliggere av utførelse B og to trykkbelastete utliggere av utførelse A for system 20 B. Tegningene av disse to utliggerne med tilhørende dimensjonerende verdier finnes i appendiks A.

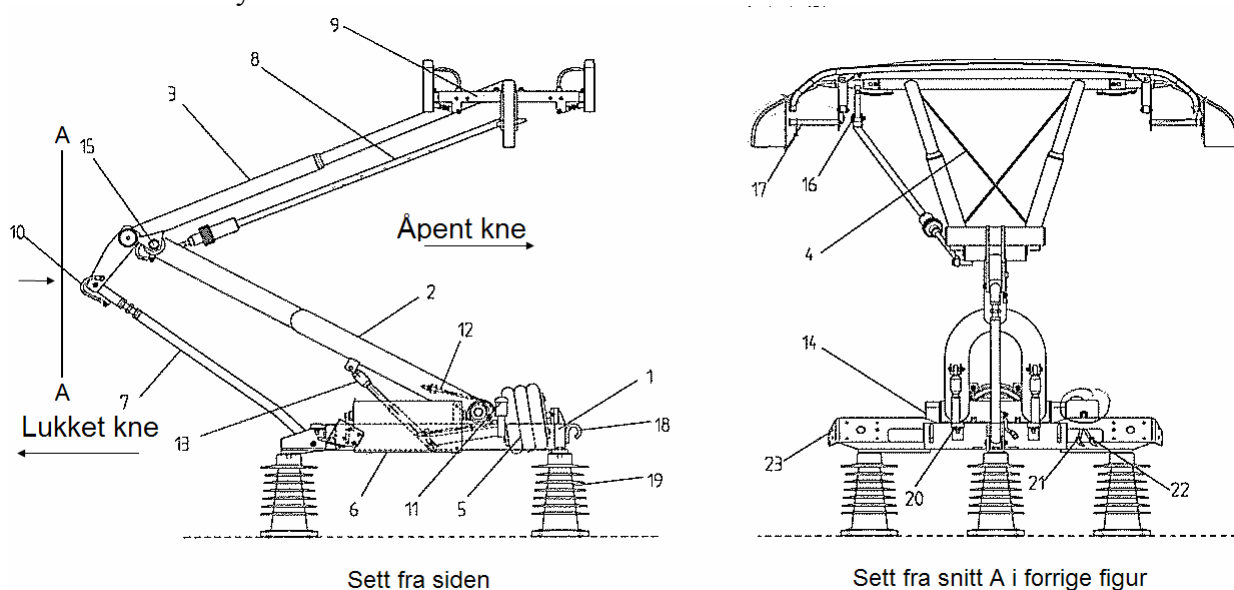
I Tabell 2-1 er de dimensjonerende verdiene for strekkbelastet og trykkbelastet utligger for system 20 listet opp.

2.2 Strømvapteren

Strømvapteren sitter på taket til toget og toppstykket består av to slepekull som er i kontakt med kontaktledningen. Disse har til hensikt å føre over strøm fra kontaktledningen til det elektrisk drevne toget uten at det oppstår brudd som kan medføre driftskade på materiellet samt at de skal sørge for at den totale kraften (statiske + aerodynamiske) mot kontaktledningen ligger innenfor de tillatte grensene.

For å beskrive bevegelsen til strømvapteren benyttes betegnelsen åpent og lukket kne. Ved normal kjøreretning vil den kjøre med åpent kne i kjøreretningen, men er også godt egnet for å kjøre med lukket kne i kjøreretningen.

Denne oppgaven tar for seg strømvapteren av type WBL 88 som vist i Figur 2-7 og beskrevet i Tabell 2-2. Informasjon om dens parametre ble mottatt i et møte med Bertil Eriksson fra Schunk i Oslo City den 14.12.06.



Figur 2-7 Strømvapter WBL 88. Sett fra siden og fra snitt A

Tabell 2-2 Elementene til strømvapteren

Elementer i strømvapteren					
1.	Grunnramme	✓	12.	Rustfri wire	
2.	Nedre saksearm	✓	13.	Svingedemper	✓
3.	Øvre saksearm	✓	14.	Hovedlager	
4.	Diagonalstag	✓	15.	Øvre sakselager	
5.	Luftbelgsylinder/Løfte- og senke-system	✓	16.	Parallellføringslager	
6.	Ventilskap/styreenhet	✓	17.	Aerodynamisk vinge	
7.	Koblingsstag	✓	18.	Løftekrok	
8.	Parallellføringsstag	✓	19.	Isolatorer	✓
9.	Toppstykke	✓	20.	Buffer nedre saksearm	
10.	Kobberlisser		21.	Innkommende luft	
11.	Buffer øvre saksearm		22.	Signalledning	
			23.	Høyspenningstilkobling	

I prinsippet er det elleve hovedelementer som beskriver strømvapteren, se markeringene i listen ovenfor. Strømvapteren er plassert på tre *isolatorer* (19) som skal isolere strømvapteren fra materiellets tak. Strømvapterens kraft mot ledningen kalles statisk oppløft og styres av

styreenheten (6). Denne er innstilt på 60 N og holdes konstant uansett arbeidshøyde på strømvatageren. *Koblingsstaget* (7) har til hensikt å binde sammen *grunnrammen* (1) med *øvre saksearm* (3). Dens lengde er justerbar for å kunne justere strømvatagerens hviletilstand og for å finjustere strømvatagerens oppløftskraft ved lavere arbeidshøyder. *Øvre saksearm* (3) er festet til toppstykkets gjennomgående aksel. For å øke strømvatagerens sidestabilitet er det festet to *diagonalstag* (4) mellom saksens langsgående rør. *Toppstykke* (9), også kalt primærfjæring, tar opp de høydeforandringene på kontaktledningen på opptil 30 mm. Høydeforandringene som overstiger dette taes opp av strømvatagersaksen som er lagret i den øvre saksearmen. Dette er sekundærfjæringen.

Parallellføringsstaget (8) består av en vridemper som styrer toppstykkets parallellføring med kontaktledningen. Vridempene tillater langsomme vridebevegelser uten vesentlig motstand, mens raske vridebevegelser vil dempes. Primærfjæringen i toppstykket og parallellføringsstagets vridempere gjør at kullstykkene ligger parallelt med kontaktledningen ved ulike høyder på kontaktledningen. *Nedre saksearm* (2) er festet til *grunnrammen* (1) i ene enden og *øvre saksearm* (3) i andre enden. På nedre delen er det to kurveskinner. Disse styrer kraften påført av løfte- og senkesystemet (5) over to stålwire. Denne kraften er slik at oppløftet mot kontaktledningen holdes konstant uansett strømvatagerens arbeidshøyde. For å dempe eventuelle svingninger er strømvatageren også utstyrt med to *hydrauliske dempere* (13).

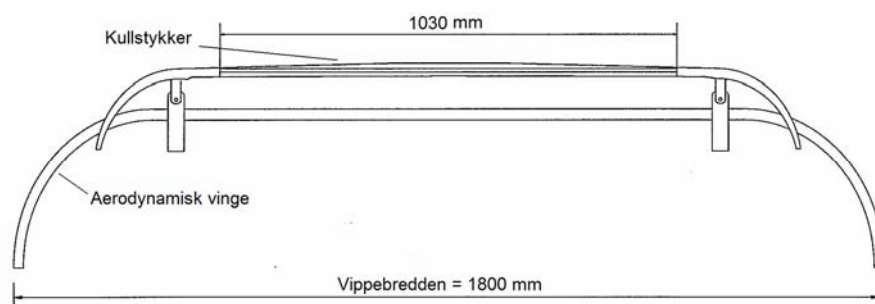
Strømvatagerens funksjon kan sammenfattes i tre ulike faser. Dette er reisning, drift og senkning.

Strømvatageren reises ved at det går en luftstrøm som samler seg opp i luftbelgsylinderen (5). Da trykket her blir ca. 3.5 bar beveger sylindren seg utover og trykker via to valere den nedre saksen oppover. Den nedre saksen løfter videre den øvre saksen, toppstykket og den øvre delen av koblingsstaget vertikalt oppover. Det statiske oppløftet mot kontakttråden som strømvatageren gir er ca. 55 N. Ved hastigheter over 100 km/h blir systemet påvirket av de aerodynamiske kreftene. I tilfelle disse kreftene blir for høye eller for lave, benyttes to aerodynamiske vinger på toppstykket for å kompensere de.

I [Teknisk regelverk,04] i JD 540 står det at den statiske kraften mellom kontakttråd og strømvatager skal settes lik 55 N ved simulering av et kontaktledningssystem. Strømvatageren skal være aerodynamisk utbalansert med en kraft på maksimalt 120 N mellom kontakttråd og bæreline for hastigheter større enn 250 km/h.

I denne oppgaven sees det kun på strømvatageren når den er i drift. Det vil si at den allerede er i oppreist stilling og at den har en statisk kraft på 55 N.

2.2.1 Toppstykket



Figur 2-8 Toppstykket på strømvatageren

Toppstykket består hovedsakelig av to kullstykker og to aerodynamiske vinger. De aerodynamiske vingenes hensikt er å justere de aerodynamiske kreftene ved større hastigheter slik at den totale oppløftskraften (statisk + aerodynamisk) ligger rundt 100 N ved 200 km/h.

For å unngå slitasje på et og samme sted på slepekullet, spennes kontaktledningen opp i sikksakk over spormidtt slik at det blir en vekselvis sidebevegelse mellom kontakttråden og strømvtageren. Det er derfor viktig at denne bevegelsen ikke blir så stor at kontakttråden glir av vippen. Dette samt slitasje, kan føre til neddriving av kontaktledningen. Bredden til toppstykket og den aerodynamiske vingen utgjør vippebredden og er 1,8 meter.

2.3 Oppsummering av kontaktledningsparametere

I Tabell 2-3 er det gjort en oppsummering av de parametrene som vil gjelde for kontaktledningssystemet som skal modelleres.

Tabell 2-3 Kontaktledningsparametere

Parametere	Enhet	System 20 B
Sikksakk	mm	± 300
Nedheng	cm	6,5
Systemhøyde	mm	1600
Tillatt oppløft	mm	130 (vanlig 6-7 cm)
Spennlengde	m	65
Kjørehastighet	km/h	100-160
Maks oppløft av direksjonsstag	m	0,1
Statisk oppløftkraft	N	55

2.4 Krefter mellom strømvtager og kontaktledning – kontaktkraft

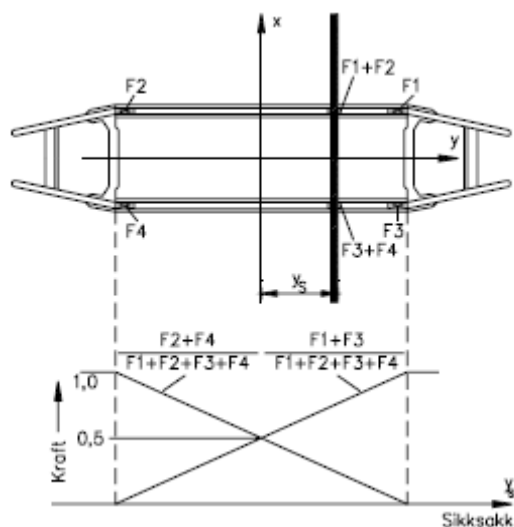
Med kontaktkraft menes den kraft som til enhver tid eksisterer mellom slepekull og kontakttråd. Elektriske trekkaggregater krever en mest mulig avbruddsfri og lysbuefri strømvtaking ut i fra hensyn til slitasje, levetid og kvalitet på både strømvtager og kontaktledning. Kravene for høye krefter er satt ut i fra tilgjengelig oppløft på kontaktledningen mens kravene om lave krefter er satt ut i fra et ønske om færrest mulig fraslager. Økt belastning i forbindelse med flere aktive strømvtagere i samme tog, ved multiplert kjøring, er lagt til grunn i den øvre grensen som kraften ikke bør overskride. Ved fraslager, dårlig strømvtaking (strømvtageren og kontaktledningen mister kontakten), kan det skje at strømmen fra kontakttråden overføres gjennom en lysbue over lengre strekninger, noe som ofte skjer ved riming på kontakttråden. Det dannes perler på kontakttråden som vil slites bort når neste tog passerer. Disse perlene vil kunne ødelegge strømvtageren eller føre til neddriving av kontaktledningen. Dette setter en nedre grense som totalkraften mellom strømvtager og kontaktledning ikke bør underskride.

Kontaktkraften kan deles i følgende målbare komponenter:

- Statisk kraft (F_s) måles ved toghastighet $v=0$.
- Aerodynamisk kraft (F_d) er avhengig av strømvtagerens konstruksjon og massefordeling. Denne kraften måles ved å holde strømvtagervippen litt under kontakttråden.

Figur 2-9 viser de totale kreftene som slepekullstykket utøver på kontaktledningen.

Strømvtageren består av to slepekullstykker og på hver av disse vil det være en kraft i hver ende. Totalt er det derfor fire krefter. På det fremre slepekullstykket (I) betegnes kreftene for F_1 og F_2 , og på det bakerste slepekullstykket (II) betegnes kreftene for F_3 og F_4 . Ved å summere fremre og bakre krefter oppnås den samlede kraft, kalt F_{tot} .



Figur 2-9 Fremre og bakre slepekull

Summen av kreftene på det fremre og bakre slepekullet:

$$F(I) = F_1 + F_2$$

$$F(II) = F_3 + F_4$$

De totale kreftene på fremre og bakre slepekull:

$$F_{tot} = F(I) + F(II)$$

I lærebok for kontaktledningsingeniører [Sture,93] er statiske og dynamiske kriterier beskrevet. I [Teknisk regelverk,04] JD 542 kapittel 5d er middelkraft, standardavvik og krefter ved måling beskrevet. Disse kriteriene er utdypet nedenfor.

2.4.1 Statiske kriterier

Parametere som måles når togets hastighet er lik null betegnes som statiske kriterier. Det er blant annet ønskelig å begrense oppløft av kontaktledningen. Kontaktkraften fører til løfting av kontaktledningen og denne kraften vil øke ved økt hastighet. For å begrense løftingen må elastisiteten i kontaktledningen holdes lavest mulig. Elastisiteten beregnes når kontaktledningen er i stasjonær tilstand.

2.4.2 Dynamiske kriterier

Parametere som måles når togets hastighet er større enn null betegnes som dynamiske kriterier. Med økende hastighet blir kontaktledningen foran strømvatageren, i kjøreretningen, mindre og mindre løftet, mens det bak strømvatageren blir en økende løfting.

I avsnitt 9.2 [Kiessling,Puschmann,Schmieder,01] er det beskrevet en rekke dynamiske kriterier. Et grunnleggende dynamisk kriterium er bølgeutbredelseshastigheten C_p for transversale impulser i kontaktråden som er beskrevet nærmere i kapittel 3 i denne rapporten. Bølgeutbredelseshastigheten er en fysisk grense for energioverføring med systemet kontaktledning-strømvatager. Når toget nærmer seg bølgeutbredelseshastigheten øker oppløftet av strømvatageren så mye at det ikke er tillatt å øke toghastigheten ytterligere. Alle forstyrrelser vil da ligge bak strømvatageren.

2.4.3 Middelkraft

Middelkraft (F_{mid}) er en funksjon av hastigheten, se Figur 2-10. De forskjellige kurvene er laget ut i fra følgende formler som definerer maksimum, minimum og anbefalt kurve i teknisk regelverk.

$$\begin{aligned} \text{Maksimum: } F_{mid} &= 0,000586 \cdot v^2 + 70[N] \text{ for } 0 \leq v \leq 160 \\ F_{mid} &= 0,00097 \cdot v^2 + 60,2[N] \text{ for } 160 < v \leq 250 \end{aligned}$$

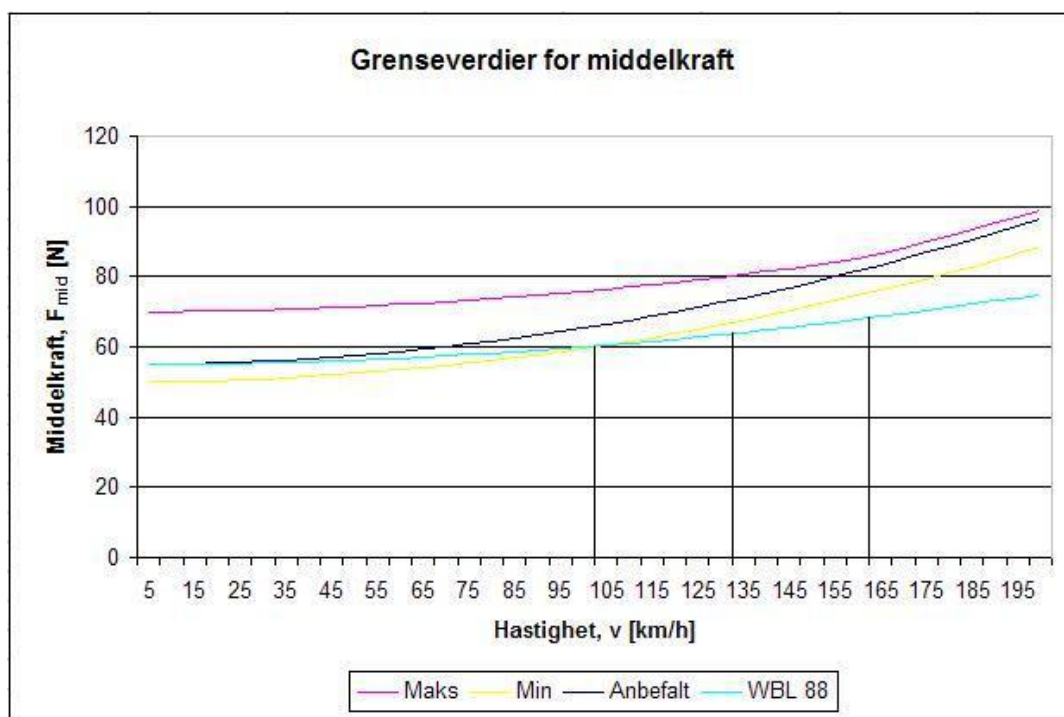
$$\text{Minimum: } F_{mid} = 0,00096 \cdot v^2 + 50[N] \text{ for } 0 \leq v \leq 250$$

$$\text{Anbefalt: } F_{mid} = 0,00104 \cdot v^2 + 55[N] \text{ for } 0 \leq v \leq 250$$

For strømvtageren WBL 88 blir F_{mid} som følger når det er oppgitt at $F_s=55$ og $F_d=0,00648v^2$:

$$F_{mid} = 0,00648 \cdot v^2 + 55[N] \quad 2.1$$

Middelkraften for denne type strømvtager, F_{mid} skal falle innenfor kravene oppgitt i teknisk regelverk.



Figur 2-10 Middelkraft som funksjon av togfremføringshastighet

Strømvtageren som benyttes til måling av krefter mellom strømvtageren og kontakttråden skal ha en aerodynamisk utbalansering som gjør at middelkraften ved en gitt hastighet er innenfor kravene gitt i Figur 2-10. Ved aerodynamisk utbalansering måles den totale oppløftskraften (statisk + dynamisk) til strømvtageren som funksjon av togfremføringshastigheten. Utbalanseringen er avhengig av vingene som blir satt på strømvtageren. Disse vingene sitter mellom de to kullstykkene på toppstykket.

Av kurven i Figur 2-10 fremkommer det at anbefalt kraft for WBL 88 er 65 N ved 100 km/h, 70 N ved 130 km/h og 80 N ved 160 km/h. Kurven viser at kreftene på WBL 88 ligger under de minste anbefalte kreftene.

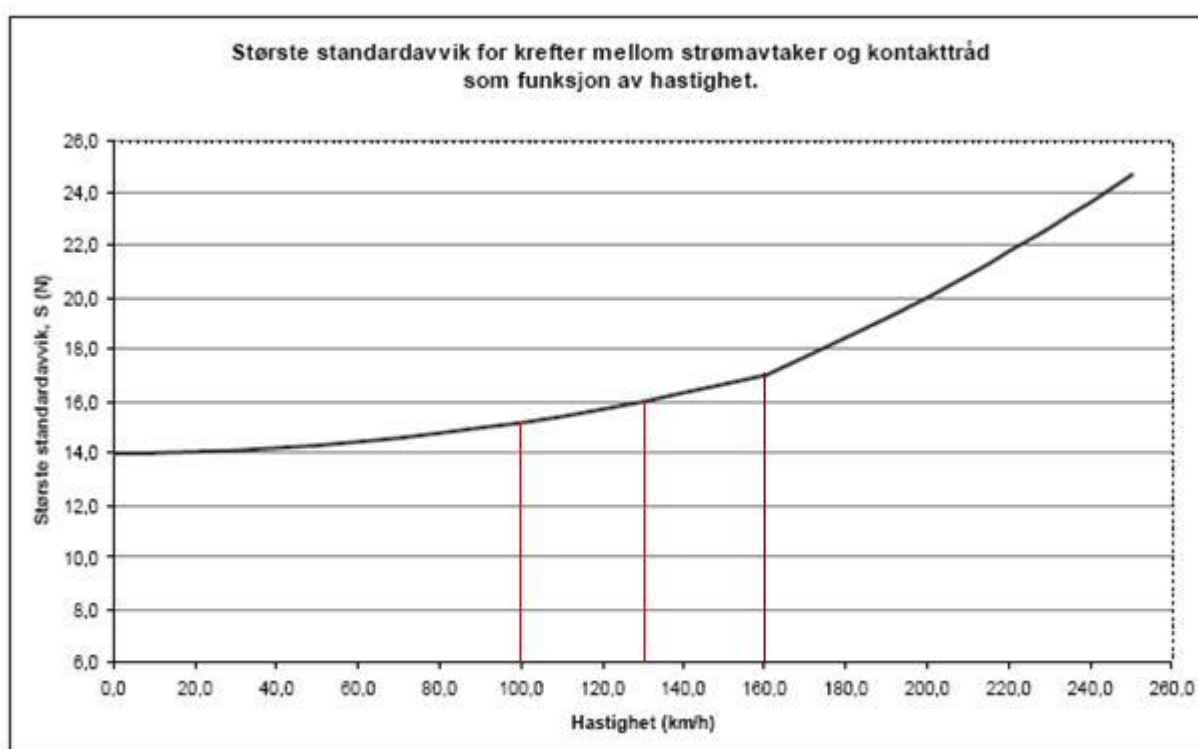
2.4.4 Standardavvik

Standardavviket (S) for en gitt hastighet bør være inntil 20 % av den maksimale middelkraften som gjelder for den samme hastigheten. Størrelsen på standardavviket er et mål på hvor godt kontaktledningsanlegget er. Stort standardavvik indikerer et stort antall lave eller høye krefter.

Standardavviket beregnes ved hjelp av følgende likning:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad 2.2$$

Figur 2-11 viser største standardavvik som funksjon av togfremføringshastighet.



Figur 2-11 Største standardavvik som funksjon av togfremføringshastighet

2.4.5 Krefter ved måling

Det stilles også krav til vurdering av utførte målinger av krefter mellom strømvogter og kontakttråd:

- Maksimal kontaktkraft: $F_{\text{maks}} = 150 \text{ N}$
- Minimal kontaktkraft: $F_{\text{min}} = 10 \text{ N}$

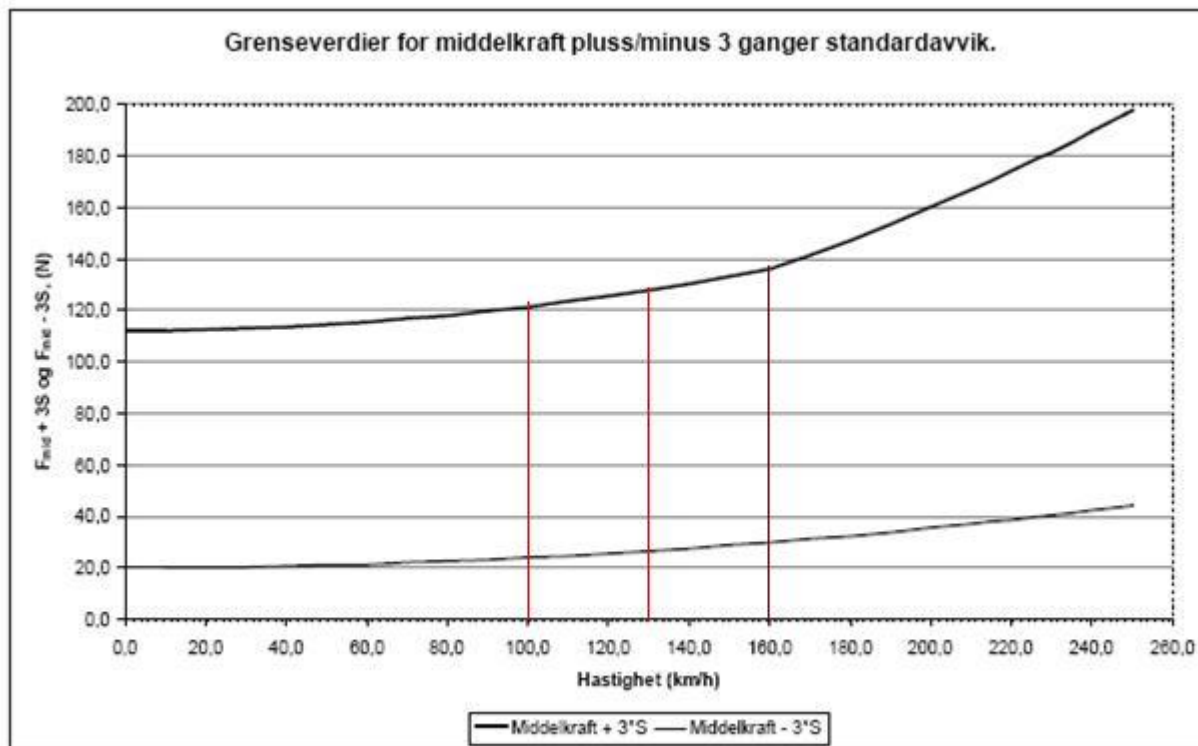
Middelkraften og standardavviket er målt til å være følgende ved 160 km/h:

- Kontaktkraftens middelverdi (F_{mid}): $F_{\text{mid}} = 80 \text{ N}$
- Standardavvik for kontaktkraften i forhold til middelverdien 20 %: $S \leq 17 \text{ N}$

Fordelingen av kreftene følger gaussfordelingsprinsippet og skal være slik:
~68,3 % av alle verdier skal ligge mellom ($F_{\text{mid}} - S$) og ($F_{\text{mid}} + S$)

- ~95,5 % av alle verdier skal ligge mellom ($F_{mid}-2S$) og ($F_{mid}+2S$)
- ~99,7 % av alle verdier skal ligge mellom ($F_{mid}-3S$) og ($F_{mid}+3S$)
- ~100 % av alle verdier skal ligge mellom 10 N (F_{min}) og 150 N (F_{maks})

Figur 2-12 viser grenseverdiene for ($F_{mid} \pm 3 \cdot S$) som funksjon av hastighet.



Figur 2-12 Grenseverdier for middelkraft $\pm 3 \cdot \text{standardavvik}$ som funksjon av togfremføringshastighet

3 Måling

3.1 Innledning

Jernbaneverkets målevogn Roger 1000 har foretatt målinger på ulike strekninger og måledataene er lagret i programmet In Office. I [Eriksson,05] er det beskrevet hvilket måleutstyr som finnes på målevognen. Denne rapporten viser også til noen statiske målekriterier og presenterer en del dynamiske måleresultater av strømvatageren ved kalibrering.

Tabell 3-1 viser en oversikt over hvilke strekninger som består av kontaktledningsnett system 20 B og hvor det er gjort målinger med en strømvatager. Disse målingene er brukt for å sammenligne høydemålinger, kraftmålinger og hastighetsmålinger med simuleringene presentert i kapittel 5. Det er hentet ut målinger for hastigheter på 100 og 130 km/h. Det er ikke funnet målinger foretatt ved en hastighet på 160 km/h på dette kontaktledningssystemet. Dette skyldes at dette er et eldre kontaktledningsnett som kan tillate hastigheter opp til 160 km/h dersom den er installert på en dobbeltsporet strekning og ytre forhold tilsier dette. Vanligst er det likevel med en strekningshastighet på 130 km/h.

Tabell 3-1 Strekningsmålinger gjort på System 20 B

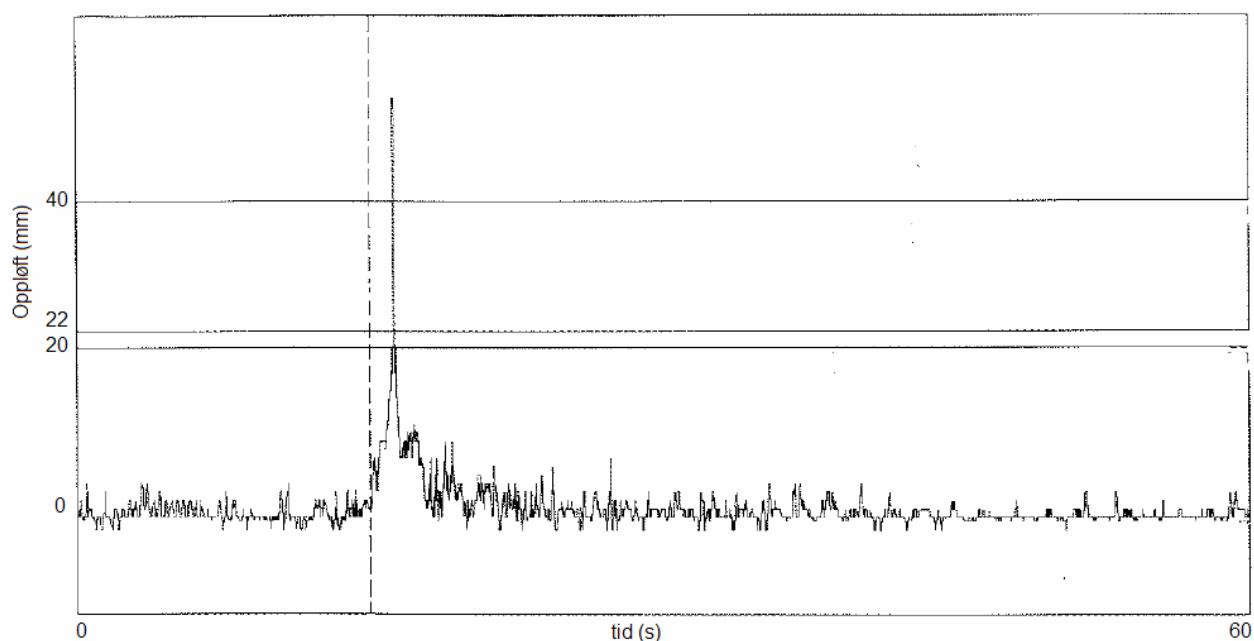
Id	Strekning	Dato	Km	Spor/kommentar
570	Sarpsborg-Kornsjø	11.04.2007	111,967-170,254	Spor 2/ Forover
310	Kongsvinger-Grensen	25.05.2007	115-136,23	Spor 2/Baklengs

Det finnes dessverre ikke noen registrerte målinger med to strømvatagere på system 20 B i In Office.

3.2 Øyeblikksmålinger

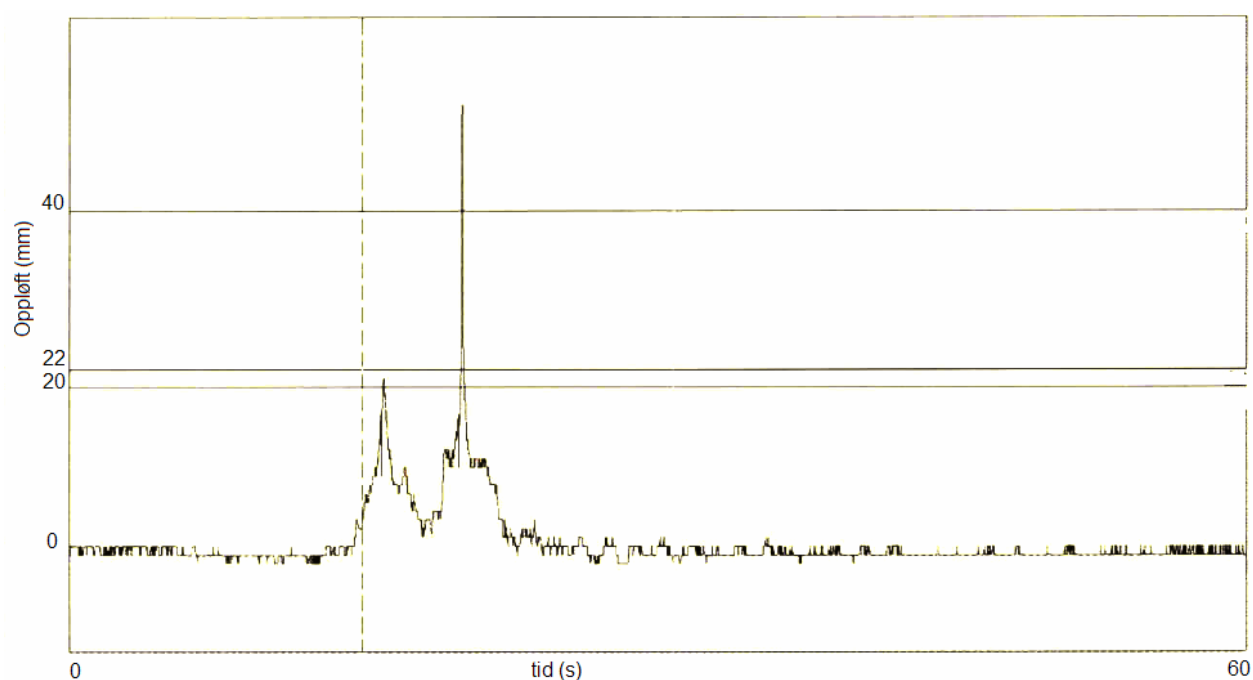
3.2.1 Seut blokkpost

Figur 3-1 viser togpassering på Seut blokkpost (km. 94,94) i nærheten av Fredrikstad. Dette er en øyeblikksrapport som viser svingningene på kontaktledningen både før og etter passering på et bestemt sted. Målingen er foretatt i nærheten av utliggeren og ca. 3 cm fra lett direksjonsstag. Hastigheten på denne strekningen er skiltet til 130 km/h og i denne målingen er hastigheten registrert å være 96 km/t og toget beveger seg i retning fra Onsøy. Figuren viser karakteristikken på svingningene og bølgeutbredelsen. Grensen for oppløft er 30 mm. Denne målingen er ikke gjort for system 20 B. Det er et system med 1000/1000 strekk med Y-line og systemet er bygget med utliggere av stål i stedet for aluminium. Dette vil ikke ha noen vesentlig konsekvens for kvaliteten på sammenligningen med simuleringene gjort i kapittel 5. Dette er en punktmåling som viser kontakttrådens bevegelse før og etter strømvatagerpassering. Det er et seksjonsfelt i området, men det fremkommer ikke av figuren siden den bare viser hvordan kontaktledningen beveger seg i et punkt.



Figur 3-1 Måling med 1 strømvatager på Seut

Figur 3-2 viser togpassering på Seut blokkpost. Toget som passerer har i dette tilfellet to strømvatagere. Dette er en øyeblikksrapport som beskrevet ovenfor. Hastigheten til toget er registrert å være 94 km/t ved passering av Seut. Det er antatt at det er ca. 5 sekunder mellom strømvatagerne. Dette tilsier at avstanden mellom strømvatagerne er på ca. 130 meter.

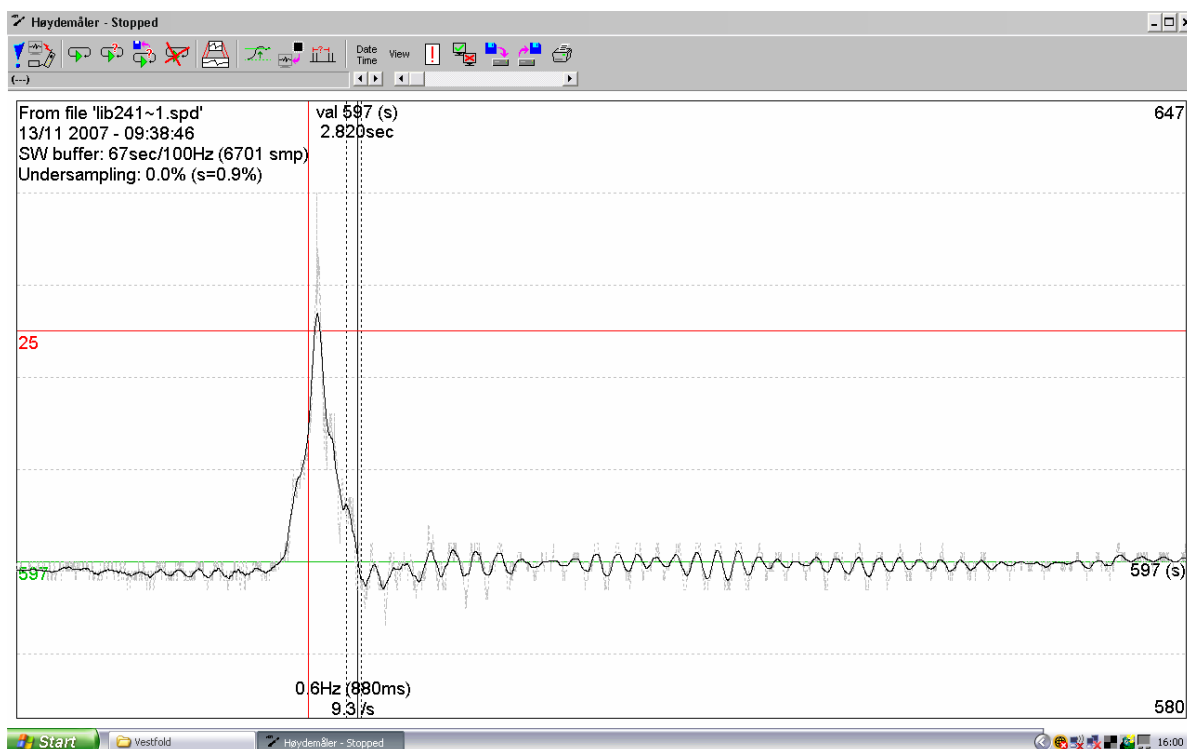


Figur 3-2 Måling med to strømvatagere på Seut

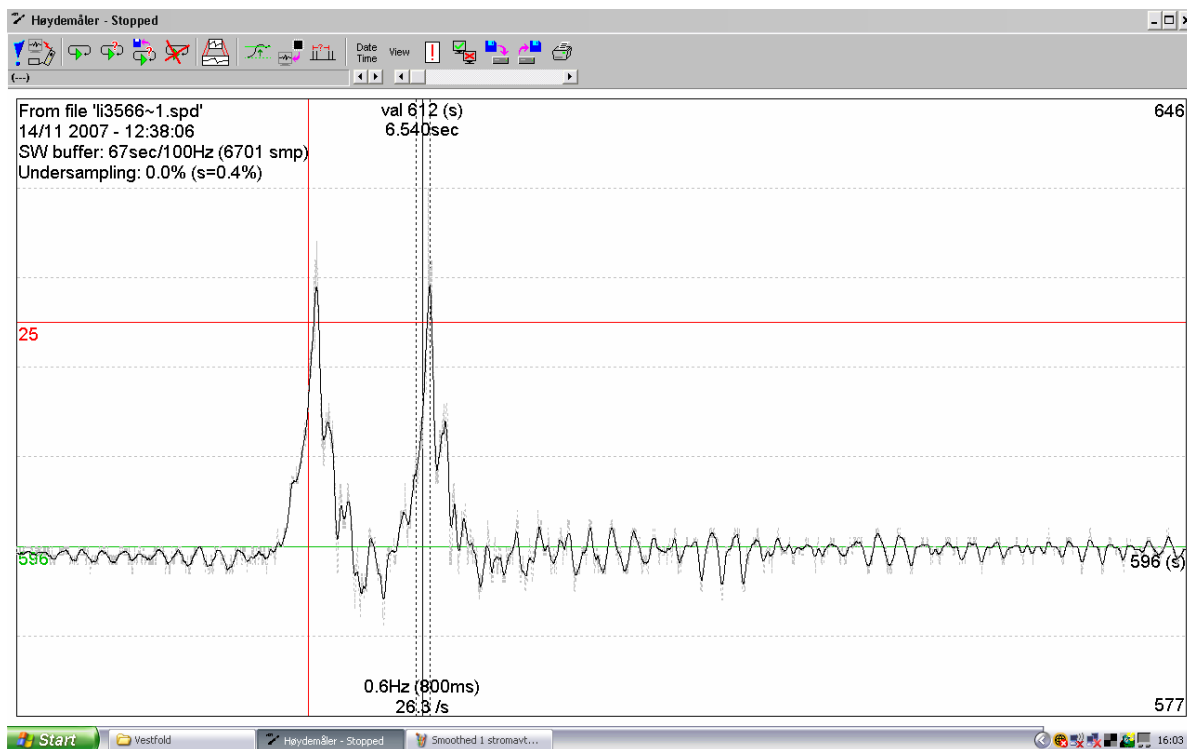
3.2.2 Vestfoldbanen

På Vestfoldbanen er det skiltet med en hastighet på 130 km/h, men kontaktledningssystemet er ikke av system 20 B. Dette vil ikke ha noen vesentlig konsekvens for kvaliteten på

sammenligningen med simuleringene gjort i kapittel 5. Disse målingene er presentert for å vise målinger gjort ved 130 km/h.



Figur 3-3 Måling med en strømvtager på Vestfoldbanen



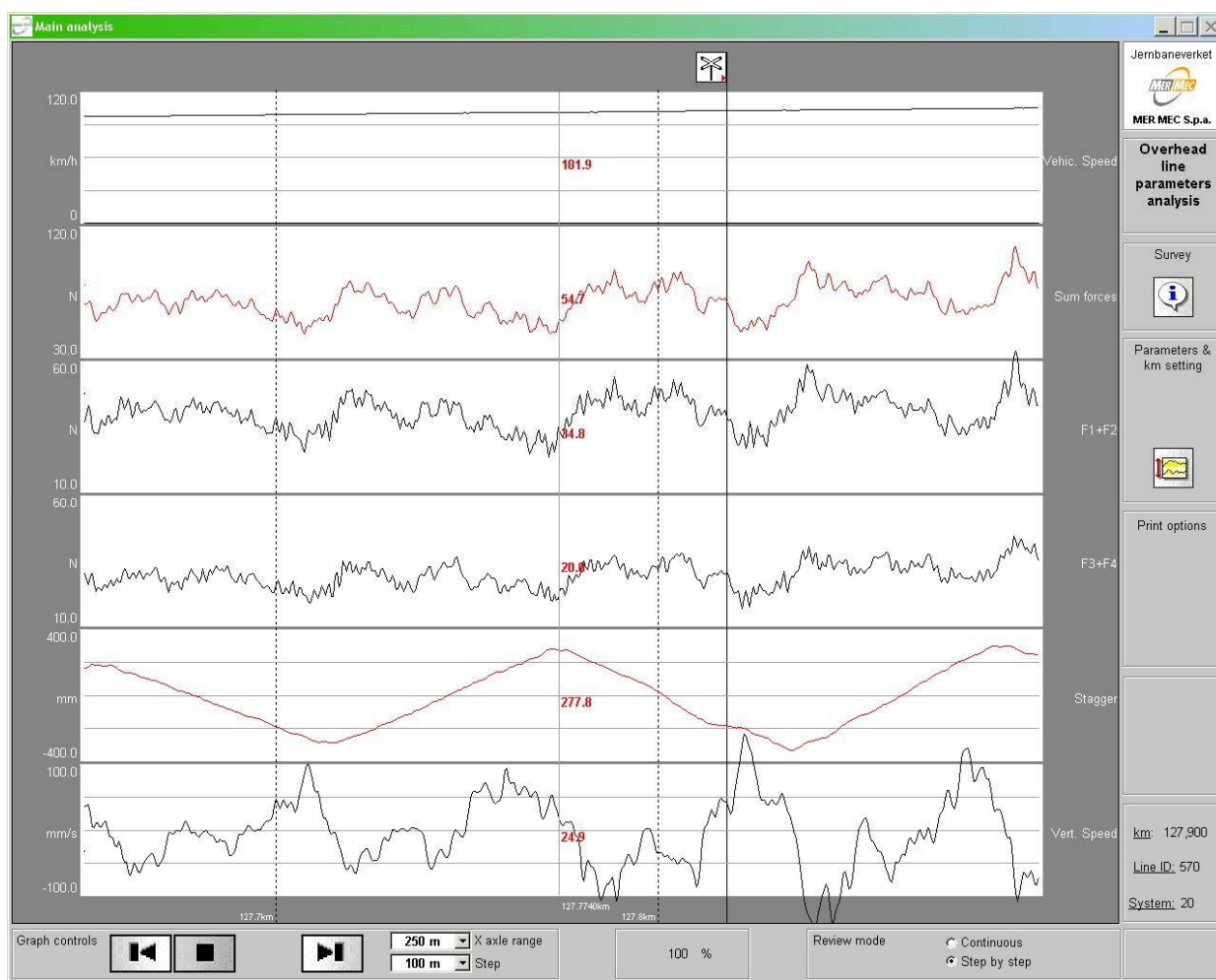
Figur 3-4 Måling med to strømvtagere på Vestfoldbanen

Figur 3-3 og Figur 3-4 viser den lille vibrasjonen på kontaktledningen før strømvogteren passerer. I det strømvogteren passerer blir det et oppløft på kontaktledningen. På det maksimale er dette oppløftet på litt over 2,5 cm. Tidsrommet fra da kontaktledningen er løftet opp til 1,5 cm til den igjen svinger seg inn rundt den stasjonære tilstanden er på ca. 2,8 sekunder i Figur 3-3. Hele vinduet viser en bevegelse som varer i 59,7 sekunder.

Tidsrommet mellom strømvogterne er målt til å være ca. 6,5 sekunder. Dersom dette toget har en hastighet i overkant av 100 km/h tilsvarer dette en avstand mellom strømvogterne på ca. 180 meter.

3.3 Måleresultater i In Office

I programmet In Office kan målingene på en valgt strekning studeres. Det bemerkes også at spennlengden på denne strekningen er 60 meter. Spennet i modellen er imidlertid 65 meter, men dette vil ikke påvirke sammenligningen betydelig. Måleresultatene presentert i Figur 3-5 er oppnådd på en rett strekning hvor toghastigheten er ca. 100 km/h over tre spennlengder.



Figur 3-5 Kraftmålinger på strekningen Sarpsborg – Kornsjø ved km 127,6-127,9. (2007)

Målingene ved utligger viser følgende verdier ved utligger:

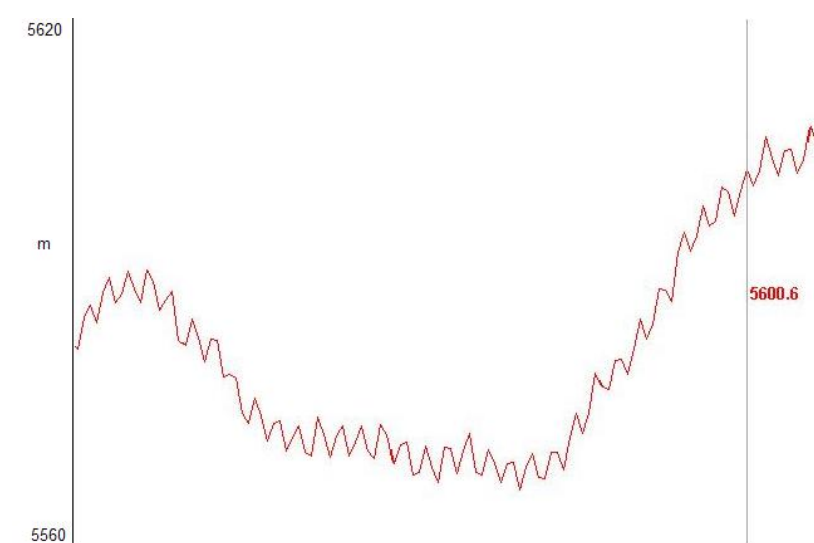
- Hastigheten er ca. 101,9 km/h
- Summen av kreftene er ca. 54,7 N

- Kreftene på det fremre slepekullet (F_1+F_2) er ca. 34,8 N
- Kreftene på det bakre slepekullet (F_3+F_4) er ca. 20,0 N
- Den vertikale hastigheten er ca. 24,9 mm/s

I tillegg er det mulig å studere høydeforandringen på kontakttråden, men det fremkommer ikke av dette bildet.

3.4 Målinger av kontaktledningshøyden

Måleinstrumentene som foretar målinger av kontaktledningshøyden inkluderer av praktiske årsaker ikke høyden til bevegelsen av toppstykket. Måleinstrumentet sitter festet på grunnrammen til strømvtageren med en tråd som er spent fast under de bevegelige kullstykkene. Målingene kan derfor få et avvik på opp til 3 cm som utgjør høydeforandringen til toppstykket. Oppsettet av måleinstrumentene er beskrevet i [Eriksson,05].



Figur 3-6 Høydemåling av kontaktledningen ved 100 km/h mellom km 127,7125 – 127,7735

Denne figuren viser en tilnærmet høydemåling av kontaktledningshøyden. På det maksimale er kontaktledningshøyden litt over 5,6 meter. Den viser også frekvensen som saksemassen svinger med samt høydeprofilen til kontaktledningen.

Tabell 3-2 viser målt kontakttrådshøyde pr. 10. meter i et spenn. Gitt at kontakttrådshøyden er 5,6 meter, kan oppløftet i forhold til nullnivået beregnes.

Tabell 3-2 Kontakttrådheving i forhold til nullnivå

Km	Høyde i mm	Oppløft i forhold til 0-nivå
127,71	5579,3	-20,7
127,72	5590,4	-9,6
127,73	5574,5	-25,5
127,74	5571,9	-28,1
127,75	5570,8	-29,2
127,76	5585,5	-14,5
127,77	5602,4	2,4
127,78	5605,7	5,7

3.5 Middelverdi og standardavvik

I programmet Eval kan målingene over en valgt strekning analyseres. Tabellene nedenfor viser maksimum og minimumsverdier samt middelkraft og standardavvik for et valgt område på strekningene Sarpsborg – Kornsjø. Tabellene inneholder beregnede verdier for hele strekningen, et område på 1 km, 180 meter og 60 meter. Det bemerkes at verdiene blir mer nøyaktige over en kortere strekning fordi toghastigheten ikke rekker å variere vesentlig (noe som medfører variasjon i kontaktkreftene) samt at eventuelle ujevnheter på en strekning utelates ved å se på kun et kortere område.

Tabell 3-3 viser analyse av kraftbeltet foretatt på hele strekningen, over 1 km, 180 meter og over en spennlengde på 60 meter når toget holder en hastighet på 100 km/h.

Tabell 3-3 Middelverdi og standardavvik ved 100 km/h på strekningen Sarpsborg – Kornsjø

Parametere	Enhet	Hele strekningen	1 km ⁺	180 m [*]	60 m [§]
Middel verdi, F_{mid}	N	68,842	69,768	66,761	65,958
Maks. verdi, F_{maks}	N	194,120	106,42	90,69	82,89
Min. verdi, F_{min}	N	5,890	36,820	46,43	46,43
Standard avvik, S	N	15,880	9,646	9,5	9,277
$F_{mid} - (3 \cdot S)$	N	21,202	40,831	38,261	38,128
$F_{mid} + (3 \cdot S)$	N	116,481	98,706	95,261	93,788
Gaussfordeling 25-50 N	%		2,459	4,36	5,17
Gaussfordeling 50-75 N	%		70,196	76,022	74,14
Gaussfordeling 75-100 N	%		27,195	19,619	20,69

+ 1 km = 127,205 – 127,201 km.

*180 m = km. 127,653 – 127,836

§ 60 m = km. 127,7125 – 127,7735

Tilsvarende analyse av kraftbeltet er utført på strekningen hvor hastigheten er ca. 130 km/h over flere spennlengder.

Tabell 3-4 viser analyse av kraftbeltet foretatt på hele strekningen, over 1 km, 180 meter og over en spennlengde på 60 meter når toget holder en hastighet på 130 km/h.

Tabell 3-4 Middelverdi og standardavvik ved 130 km/h på strekningen Sarpsborg – Kornsjø

Parametere	Enhet	Hele strekningen	1 km ⁺	180 m [*]	60 m [§]
Middel verdi, F_{mid}	N	68,842	71,006	71,202	66,656
Maks. verdi, F_{maks}	N	194,120	112,9	94,96	94,26
Min. verdi, F_{min}	N	5,890	35,94	44,5	44,5
Standard avvik, S	N	15,880	12,052	9,729	9,335
$F_{mid} - (3 \cdot S)$	N	21,202	34,85	42,015	38,650
$F_{mid} + (3 \cdot S)$	N	116,481	107,163	100,389	94,662
Gaussfordeling 25-50 N	%		3,811	1,373	3,871
Gaussfordeling 50-75 N	%		62,237	62,7	77,419
Gaussfordeling 75-100 N	%		32,247	35,927	18,71
Gaussfordeling 100-125 N	%		1,705		

+ 1 km = 115,504 – 116,5 km.

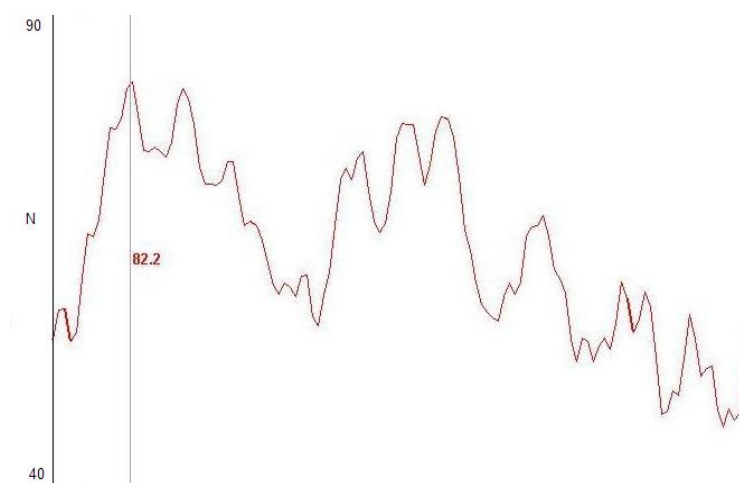
*180 m = km. 115,85 – 116,006

§ 60 m = km. 115,94 – 116,0

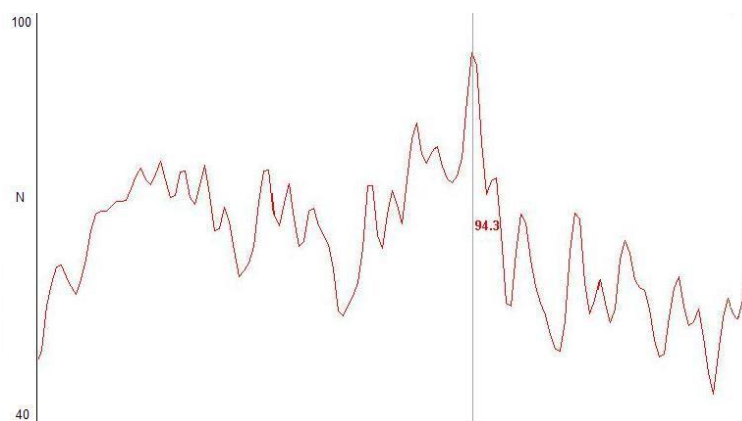
Disse målingene viser at middelverdien er litt større når hastigheten øker og at den er mest konsistent når det måles over korte avstander. Det at spennlengden varierer med 10 meter fra den ene til den andre målingen har marginal betydning.

3.6 Målinger av kontaktkreftene og den vertikale hastigheten

Målingene presentert i Figur 3-7 og Figur 3-8 er gjort med en strømvantager og viser de totale kontaktkreftene målt over et spenn (mellom to utliggere) hvor hastighetene er 100 og 130 km/h. Figurene viser at kreftene holder seg innenfor 40 og 100 N og at det ikke er noen spesiell karakteristikk på disse kurvene.

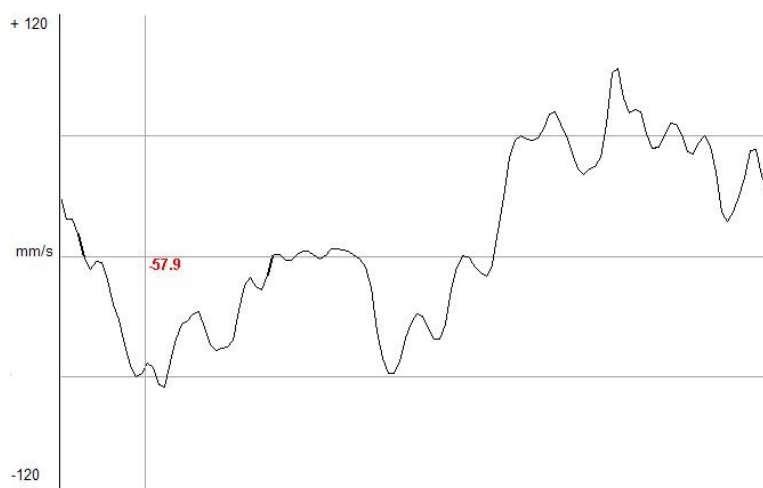


Figur 3-7 Kontaktkreftene målt på strekningen Sarpsborg – Kornsjø ved km 127,71-127,77 og ca. 100 km/h

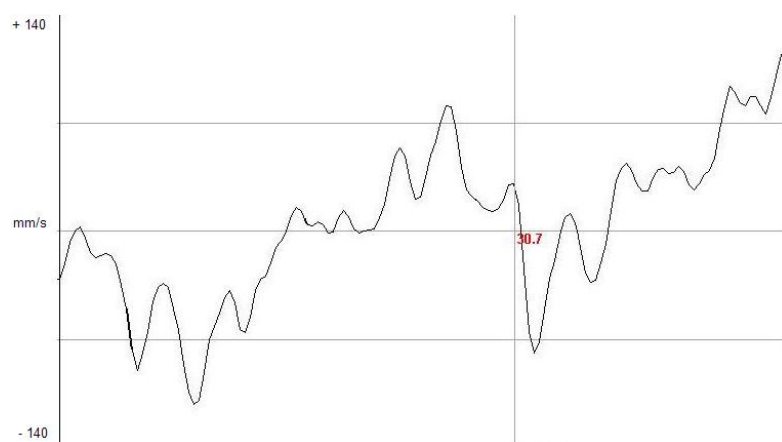


Figur 3-8 Kontaktkreftene målt på strekningen Sarpsborg – Kornsjø ved km 115,92-116,00 og ca. 130 km/h

Målingene presentert i Figur 3-9 og Figur 3-10 er gjort med en strømvantager og viser den vertikale hastigheten til kontaktledningen målt for tilsvarende spenn som ovenfor med hastighetene 100 og 130 km/h. Disse figurene viser at den vertikale hastigheten øker med økt hastighet og at den øker mot slutten av spennet i den retningen toget kjører.



Figur 3-9 Den vertikale hastigheten til kontaktledningen ved km 127,71-127,77 og ca. 100 km/h



Figur 3-10 Den vertikale hastigheten til kontaktledningen ved km 115,92-116,00 og ca. 130 km/h

3.7 Videoopptak

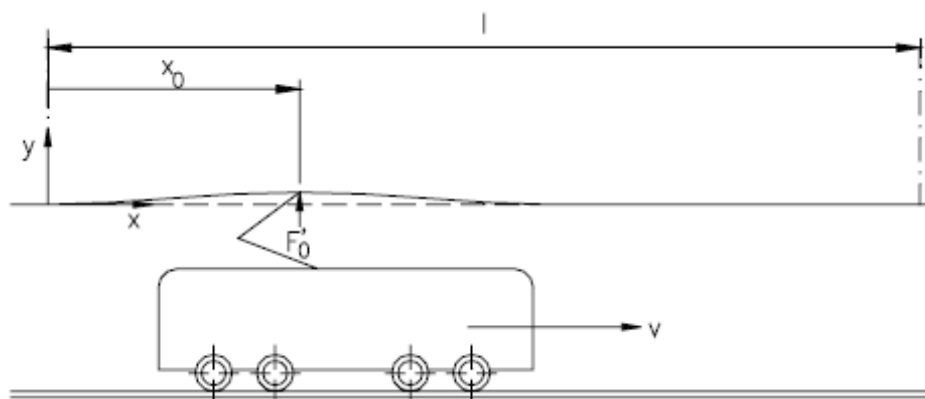
Det er laget film av bevegelsen til kontaktledningen og denne finnes på vedlagt DVD i appendiks H. Denne filmen er tatt opp i nærheten av kulverten på Børge som befinner seg mellom Leirsund og Frogner holdeplass. På dette stedet var det mulig å filme i kontaktledningens høyde. Togene som passerer her er hovedsakelig flytog som kjører i 130 km/h, men det forekommer også andre typer tog. Opptaket er gjort midt i spennet på et system 25. Nedhenget på dette systemet vil være litt større enn på et system 20 B og oppløftet er også tilsvarende større.

Hensikten med denne filmen er å presentere den karakteristiske svingningen til kontaktledningen i et bestemt punkt både før og etter togpassering. Og denne filmen bekrefter de øyeblikksmålingene presentert i kapittel 3.2. Rett før strømvatageren passerer blir det observert en svak svingning i kontaktledningen, og i det strømvatageren passerer blir det et kraftig oppløft som avsluttes med avtagende kraftige og hyppige svingninger. Det går en tid før systemet faller til ro.

4 Modellering

Strømvapteren og kontaktledningssystemet er to atskilte systemer som hver for seg er utsatt for svingninger. Disse kommer i kontakt gjennom et kontaktpunkt via strømvapterens slepekull. For å studere samvirkningen mellom strømvapter og kontaktledning må det lages en modell av det samlede system, kontaktledning og strømvapter. En dynamisk simulering av dette systemet kan gi svar på tidsforløpet for den stedbundne kontaktkraften mellom slepekullstykkene og kontakttråden og det tilhørende oppløftet av kontakttråden. En slik simulering kan beskrives ved hjelp av differensiallikninger. Siden dette er en kompleks problemstilling er det anbefalt å løse dette ved hjelp av "Finite Element Method" (FEM). I avsnitt 3.1 beskrives først belastningen på kontaktledningen og så bølgeligningen som beskriver bevegelsen til kontaktledningen.

4.1 Utbredelse av transversale impulser langs en innspent kontakttråd

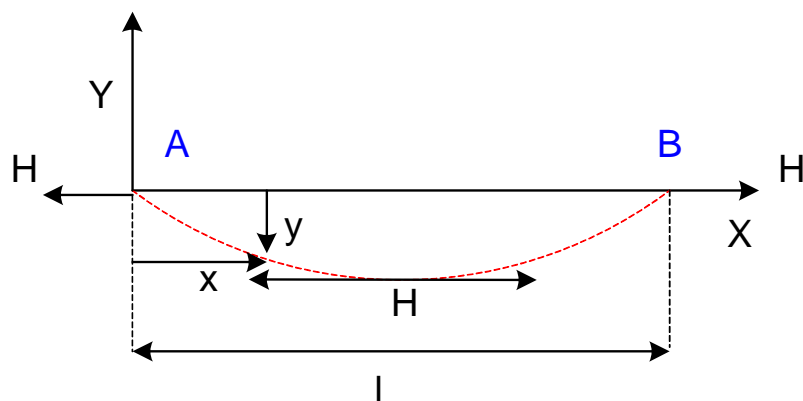


Figur 4-1 Samvirke mellom strømvapter og kontaktledning

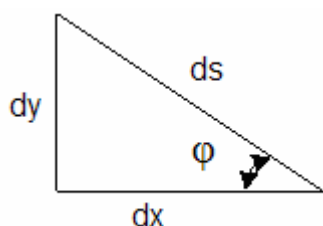
En viktig faktor for samarbeidet mellom strømvapter og kontaktledning er utbredelsen av impulser langs ledningens lengderetning i form av bølger. Bølgene oppstår når en strømvapter beveger seg bortover under kontakttråden med en kraft F og en hastighet v . En tilfredsstillende vurdering av dette fenomenet er mulig ved å betrakte kontakttråden som en innspent tråd bestående av flere elementer. Utbredelsen av en transversal impuls er egentlig et lokalt oppløft forårsaket av strømvapteren. Kontakttråden blir dermed å betrakte som et elastisk element i en tråd.

Belastning/Nedheng på kontaktledningen

Belastningen av kontaktledningen er beskrevet som følger i læreboken til [Persen,64] som omhandler likevektslære. En kabel er innspent mellom to faste punkter, A og B. X-aksen er valgt identisk med den rette linjen som går gjennom disse to punktene. Under belastning vil kabelen få et nedheng y , som øker ved tiltagende linevekt og som kan reduseres ved å øke strekkraften H . Se figur 4-2.



Figur 4-2 Nedheng til en line spent fast mellom to faste punkter A og B



Figur 4-3 Belastningen som funksjon av x , $q(x)$

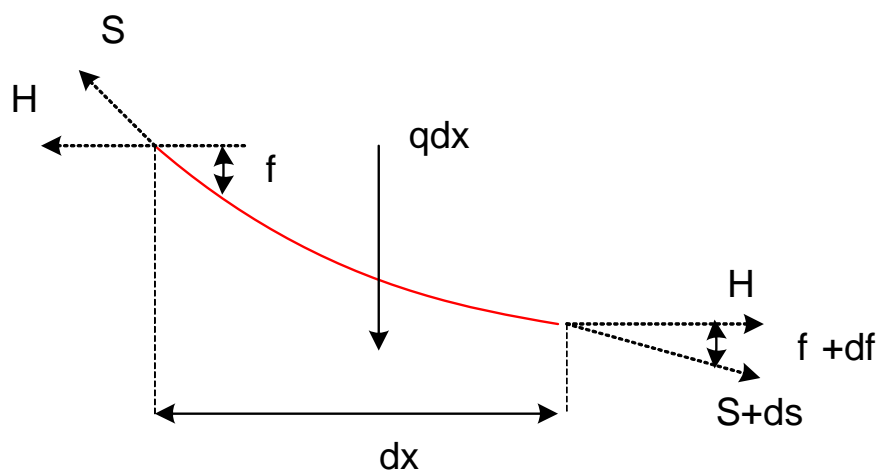
Vinkelen φ som tangenten til kabelkurven danner med den positive x-aksen er gitt ved:

$$\tan \varphi = -\frac{dy}{dx}$$

4.1

Når en line er innspent mellom to punkter forandrer også den horisontale strekkraften H seg med temperaturen t og vekten g .

Den vertikale belastning på linen vil være qdx og naboelementene som i dette tilfellet er hengetrådene, vil utøve en kraft S og $S+dS$ på elementet. Disse virker i tangentreningen til elementet i elementets begge ender. Se figuren (nedenfor).



Figur 4-4 Belastning på den spent linen

Likevektsbetingelsen i x-retning gir følgende ligning:

$$-S \cos \varphi + (S + dS) \cos(\varphi + d\varphi) = 0 \quad 4.2$$

Likevektsbetingelsen i y-retning gir følgende ligning:

$$-q dx + S \sin \varphi - (S + dS) \sin(\varphi + d\varphi) = 0 \quad 4.3$$

Ved hjelp av de elementære regler fra trigonometri lar disse ligningene seg omforme til følgende ligninger:

Likning 4.2 omformet gir:

$$d(S \cos \varphi) = 0$$

$$S \cos \varphi = H \quad 4.4$$

Likning 4.3 omformet gir:

$$-q(x) dx - d(S \sin \varphi) = 0$$

$$d(S \sin \varphi) = -q(x) dx \quad 4.5$$

Ved å innføre S uttrykt ved H i fra likning 4.2 i likning 4.3 får en:

$$d\left(\frac{H \sin \varphi}{\cos \varphi}\right) = -q(x) dx$$

$$\frac{d(H \tan \varphi)}{dx} = -q(x)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{q(x)}{H} \quad 4.6$$

Dette er ligningen til bestemmelse av funksjonen y(x). Når likningen (4.6) ovenfor integreres to ganger med hensyn på x oppnås følgende likning:

$$y = C_0 + C_1 * x + \frac{q_0}{2H} x^2 \quad 4.7$$

Konstantene C0 og C1 bestemmes ut i fra betingelsen om at y skal være lik 0 når x=0 m og x=l=65 m. Dette gir at:

$$C_0 = 0 \quad C_1 = -\frac{q_0 * l}{2H} \quad 4.8$$

Når belastningen er jevnt fordelt langs kabelens horisontalprojeksjon vil kurven y(x) være en parabel.

$$y = \frac{q_0 * x}{2H} (x - l) \quad 4.9$$

Hvorav q er en konstant: $q(x) = q_0$

Kraften på kontaktledningen

Etter en transversal utbøyning av en tråd som er innspent med kraften $H=\sigma A$ virker det på hvert trådelement med lengde dx en tilbakevirkende kraft:

$$F_y = H_0 \sin(\alpha + d\alpha) - H_0 \sin(\alpha)$$

Uttrykket for den tilbakevirkende kraften:

$$F_y = q(x) = H \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} = \sigma \cdot A \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} \quad 4.10$$

Massen for en tråd med lengden dx er $dm=\gamma A dx$. Bevegelsesligningen for elementet med lengden dx er dermed:

$$F_y = dm \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} \quad 4.11$$

Hastigheten på kontaktledningen

Hastigheten impulsen forplanter seg med langs kontakttråden kalles bølgeutbredelseshastigheten. Følgende uttrykk gjelder for bølgeutbredelseshastigheten, C_p .

$$C_p = \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma}} \quad 4.12$$

Hvor: σ = kontaktledningens strekkspenning

γ = kontaktledningens tetthet

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{\gamma}{\sigma} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad 4.13$$

Bevegelseslikningen (4.14) for en innspent kontakttråd (bølgeligningen) er presentert i [Kiessling, Puschmann, Schmieder, 01].

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = C_p^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{F_0'}{\gamma} \delta(x - x_0) \quad 4.14$$

hvor benevnningen for de ulike enhetene er:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= \left[\frac{m}{s^2} \right], \frac{1}{C_p^2} = \left[\frac{s^2}{m^2} \right], \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \left[\frac{m}{m^2} \right], F_0' = \left[\frac{kg \cdot m}{s^2} \right], \\ m &= \left[\frac{kg}{m} \right], \delta(x - x_0) = \left[\frac{1}{m} \right], \gamma = \left[\frac{kg}{m^3} \right] \end{aligned} \quad 4.15$$

Ved en dimensjonsanalyse av den oppgitte formel finner vi ut at det blir ukorrekt dimensjon i det siste leddet. Dette skyldes dimensjonen til γ . Ved å erstatte ' kg/m^3 ' med ' kg/m ' som representerer "masse per enhet" oppnås riktig formel for bølgeligningen.

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = C_p^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{F_0'}{m} \delta(x - x_0) \quad 4.16$$

Denne ligningen tar kun for seg den statiske kraften som en strømvtager utøver på kontaktledningen og ikke selve gravitasjonen til kontaktledningen. Ved å supplere den ovenstående likningen med kontaktledningens gravitasjonskraft kan vi studere bevegelsen til kontaktledningen ved en gitt kraft.

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = C_p^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{F_0'}{m} \delta(x - x_0) - g \quad 4.17$$

For å kunne modellere ønsket system med ønsket strømvtager ble det nødvendig å modellere systemet ved hjelp av en "Finite Element Method" modellering.

4.2 Finite Element Method (FEM)

"Finite Element Method" er brukt for å finne tilnærmet løsning av partielle differensiallikninger (PDE). "Finite Element Method" er en metode med stykkevis tilnærming hvor tilnærmingsfunksjonen blir laget ved å sette sammen mange enkle funksjoner. Hver funksjon er definert for et lite begrenset område. En "finite element analysis" består typisk av følgende trinn [Cook, Malkus, Plesha, 89]:

- Dele opp strukturen i definerte elementer
- Definere egenskapene til hvert element
- Sammenstiller elementene for at de skal inngå i strukturen til "finite element model"
- Spesifisere hvordan modellen holdes oppe ved hjelp av trykk og strekk
- Løse likningen for å bestemme forflytning i trykk, strekk, temperatur, krefter og lignende.

Programmet Comsol er benyttet i modellering av kontaktledningssystemet og systemet er modellert i 3D for å gi en mest mulig realistisk modell. Kontaktledningen, hengetrådene og bærelinen er modellert som et kabelement og utliggerne som et bjelkeelement i en "structural mechanics modul". Dette systemet løses ved hjelp av en tidsvariant analyse.

4.3 Modellering av kontaktledningssystemet

Kontaktledningssystemet, system 20 B, består av både kabelementer og bjelkeelementer som blir utsatt for både loddrette og sideveise belastninger. De loddrette belastningene er kontaktledningens egenvekt og kontaktledningens linestrekk. Belastningene fra siden kan være vindutblåsning. Ved hjelp av FEM deles kontaktledningen opp i differensielle elementer som er knyttet sammen med koblinger som er enklere å beskrive matematisk.

Aksene i det modellerte systemet er definert som følger:

- X-retningen angir lengderetningen (totalt 195 m). Bevegelse i x-retning betegnes med variabelen "u" i Comsol.
- Y-retningen angir siksakk til kontaktledningen (totalt +/-0.3m). Bevegelse i y-retning betegnes med variabelen "v" i Comsol.
- Z-retningen angir høyden og forflytningen til kontaktledningen og strømvtageren (totalt 1,6 m). Bevegelse i z-retning angis generelt med variabelen "w" i Comsol. I Matlab er de ordinære differensiallikningene for høydeforandringen (1. deriverte av høyden) angitt med variabelen "dX" og hastighetsforandringen (2. deriverte av høyden) angitt med variabelen "DdX".

4.3.1 Antagelser og forutsetninger

Følgende antagelser og forutsetninger ligger til grunn for den forenklete modellen:

- Det er kun bevegelse i xz-planet
- Lengden på bølgen som genereres på kontaktledningen er større enn 5 m

4.3.2 Teoretisk bakgrunn

Beskrivelse av bjelkeelementene

I Comsol beskrives bjelkeelementene ved hjelp av variabler for trådstrekk, termisk strekk, opprinnelig last og strekk. Ligningene er som følger:

Trådstrekket i bjelkeelementene er beskrevet ved hjelp av følgende ligning:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Hvor E er kjent som Young's elastisitets modul, mens ε er bjelkeelementets strekk.

Temperaturen vil variere lineært over bjelkeelementet. Dette beskrives ved følgende likning:

$$T = T_m + \Delta T_z \frac{z}{h_z} + \Delta T_y \frac{y}{h_y}$$

Opprinnelig trådstrekk er strekket før bjelkeelementet blir utsatt for last, forflytning og annet strekk. Fordelingen av strekket er gitt som moment og normal kraft.

$$M = \int_A \sigma_i x dA \quad N_i = \int_A \sigma_i dA$$

Det vil ikke bli gjort studier av de kreftene som virker på utliggeren i denne oppgaven. Men det har vært nødvendig å modellere disse utliggerne for å få en mest mulig realistisk modell.

Beregning av massedempningsparameteren og stivhetsparameteren

Rayleighdempning blir brukt i modeller hvor dempningen antas å være proporsjonal med en lineær kombinasjon av stivheten og massen. Følgende bevegelsesligning beskriver dynamikken til dette systemet:

$$m \frac{d^2 w}{dt^2} + c \frac{dw}{dt} + kw = f(t)$$

I Reyleighs dempningsmodell er dempningsparameteren "c" uttrykt i form av massen m og stivheten k:

$$c(i) = \alpha_{dM} m + \beta_{dK} k$$

Likning 4.17 benyttes for å beregne verdiene til massedempningsparameteren (α) og stivhetsparameteren (β).

$$\xi(i) = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_{dM}}{\omega} + \beta_{dK} \cdot \omega \right) \quad 4.18$$

Ved systemer med stor innspenningskraft blir systemet dempet ved $f_1=0,99$ og $f_2=1,98$ Hz. Dette betyr at

- den totale dempningen (c) antas å være ca. 1 %
- dempningsområdet antas å være mellom 0,99 og 1,98 Hz

Følgende verdier settes inn:

$$\xi(1) = \xi(2) = 0,01$$

$$\omega(1) = 2 * \pi * f_1 = 6,22$$

$$\omega(2) = 2 * \pi * f_2 = 12,44$$

Ved å sette disse verdiene inn oppnås $\alpha = 0,082933$ og at $\beta = 0,0010718$. Disse parametrene er brukt videre i modelleringen for både bjelke- og kabelelementene.

Beskrivelse av kabelelementene

Kabelelementene modelleres ved hjelp av Lagrange funksjon. Denne funksjonen gjør det mulig å spesifisere både normal strekk og Green-Lagrange strekk for å håndtere små strekk like godt som store strekk.

Strekket i linen kan beskrives enten som strekk ved små forflytninger eller som Green-strekk for store forflytninger.

$$\varepsilon_{ijT} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \bigg|_T + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \bigg|_T + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \bigg|_T + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \bigg|_T \right)$$

Strekk-trykk relasjonen beskrives som følger når termisk strekk og opprinnelig strekk taes med:

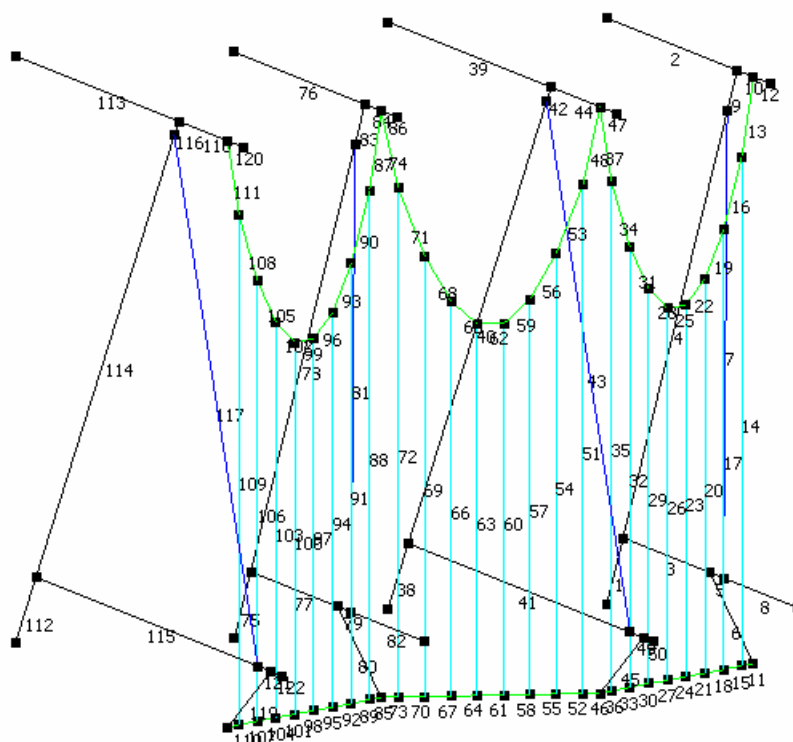
$$\sigma_n = E(\varepsilon_n - \alpha(T - T_{ref}) - \varepsilon_{ni}) + \sigma_{ni}$$

Prinsippet om virtuelt arbeid resulterer i følgende formulering:

$$dW = d \int_V (-\varepsilon_n \sigma_n + u^t F_V) dV + \sum_i u^t F_{Pi}$$

4.3.3 Modellering av kontaktledningen som kabelelement

Modellen til kontaktledningssystemet består som nevnt av kontaktledning, bæreline, sikringsline og hengetråd. Disse fire ulike elementene er definert som kabelelement (truss) siden de vil gi etter for en påtrykt kraft. Det vil bli en utbøyning på elementet som gir grunnlag for svingninger.



Figur 4-5 Kabelelementene i kontaktledningssystemet

De fargede elementene i Figur 4-5 er modellens kabelelementer. Egenskapene til hvert av kabelelementene er beskrevet i tabellen nedenfor.

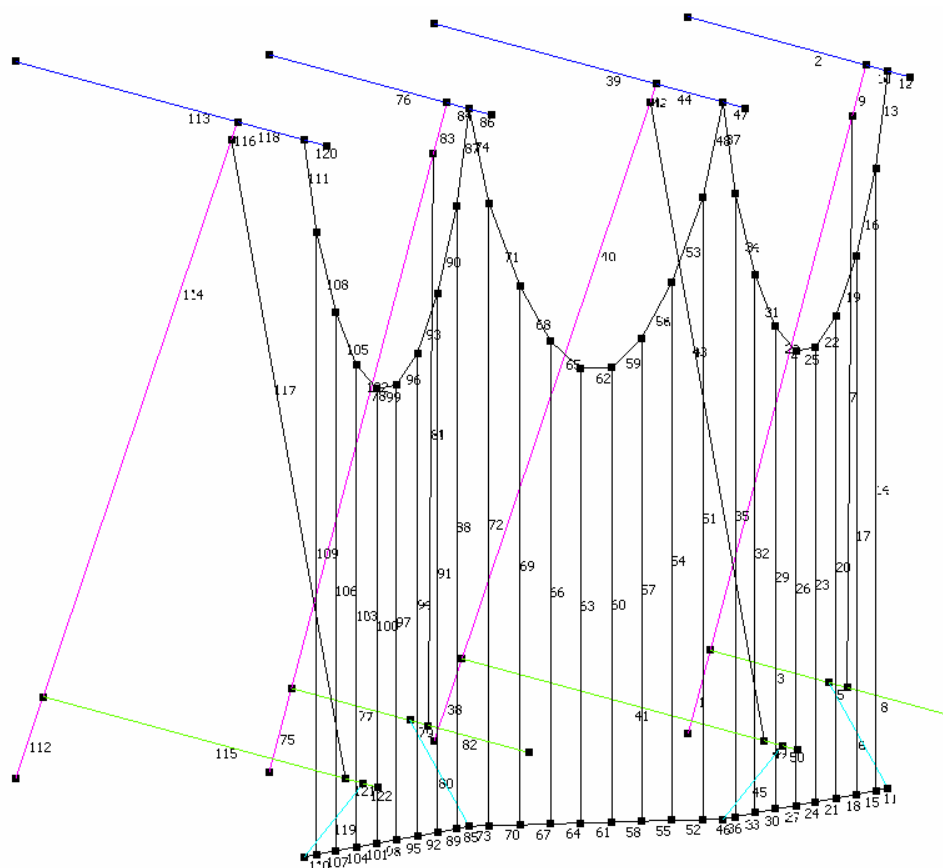
Tabell 4-1 Egenskapene til kabelelementene

Egenskapene	Utrykk	Enhet	Kontakttråd	Bæreline	Hengetråd	Sikringsline
Farge på element			Grønn	Grønn	Turkis	Blå
Material			Kobber (Ri 100 Cu)			Stål
Elastisitet (Young's modulus)	E	Pa	124e ⁹	113e ⁹	100e ⁹	205*e ⁹
Massetetthet	ρ	Kg/m ³	8930	9245,1	9270,8	7850
Lengdeutvidelseskoefisient	α	N/mm ²	1,7*10 ⁻⁵	1,7*10 ⁻⁵	1,7*10 ⁻⁵	12,3*e ⁻⁶
Massedempingsparameter	α_{dM}	1/s	0,082911	0,082911	0,082911	0,082911
Stivhetsdempingsparameter	β_{dK}	s	0,001072	0,001072	0,001072	0,001072
Tverrsnitt	A	mm ² m ²	100 0,0001	50 0,00005	9,6 0,0000096	0,000028
Trådstrekk (innspent)	σ_{ni}	kN kPa (N/m ²)	10 100 000	10 200 000		-
Last	Fz	N/m	-pA+Ftot/dU*H(t,x)	-g p A	-g p A	-g pA

4.3.4 Modellering av utliggeren som bjelkeelementer

Modellen til utliggeren består som nevnt av strekkstag, trykkstag, horisontal stag, lett direksjonsstag og sikringsline. Fire av elementene er definert som bjelkeelementer (beam) og et element er definert som et kabelelement (truss). Se Figur 4-6. Bjelkeelementene er stive legemer og får ikke utbøyning tilsvarende kabelelementene ved en påtrykt kraft.

Se appendiks A for skisse av strekkbelastet og trykkbelastet normalutligger beregnet for system 20 B.

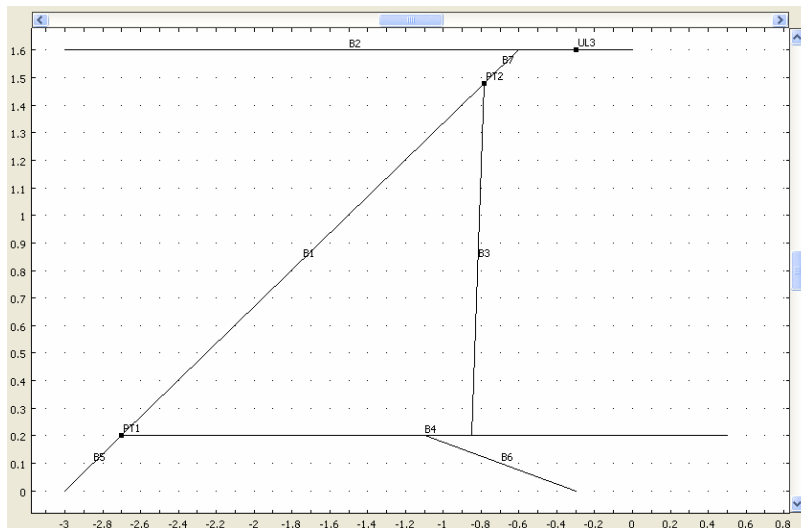


Figur 4-6 Bjelkeelementene i kontaktledningssystemet

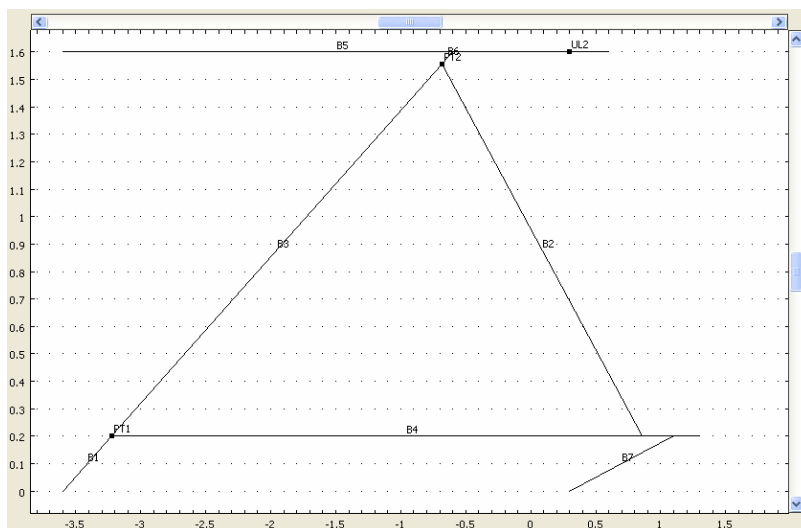
De fargede elementene i Figur 4-6 er modellens kabelelementer. Egenskapene til hvert av kabelelementene er beskrevet i tabellen nedenfor.

Tabell 4-2 Egenskapene til bjelkeelementene

Egenskapene	Uttrykk	Enhet	Lett dir.stag	Trykkstag	Strekkstag	Horis. stag
Farge			Turkis	Lilla	Blå	Grønn
Material			Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium
Elastisitet (Young's modulus)	E	Pa	$70 \cdot 10^9$	$70 \cdot 10^9$	$70 \cdot 10^9$	$70 \cdot 10^9$
Massetetthet	ρ	Kg/m^3	2700	2700	2700	2700
Lengdeutvidelseskoeffisient	α	N/mm^2	$23 \cdot 10^{-6}$	$23 \cdot 10^{-6}$	$23 \cdot 10^{-6}$	$23 \cdot 10^{-6}$
Massedempingsparameter	α_{dM}	1/s	0,082911	0,082911	0,082911	0,082911
Stivhetsdempingparameter	β_{dK}	S	0,001072	0,001072	0,001072	0,001072
Tverrsnitt	A	mm^2	0,00125	0,00384	0,00237	0,00138
Trådstrekk (innspenning)	σ_{ni}	N/Pa/	-	-	-	-
Last	F_z	N/m	$-g_c \cdot \rho \cdot A$	$-g_c \cdot \rho \cdot A$	$-g_c \cdot \rho \cdot A$	$-g_c \cdot \rho \cdot A$



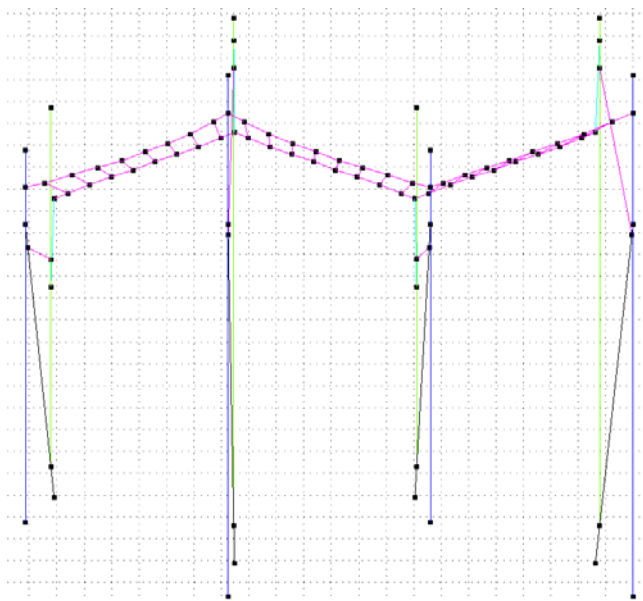
Figur 4-7 Strekkbelastet normalutligger



Figur 4-8 Trykkbelastet normalutligger

4.3.5 Modellering av sikksakk

Kontaktledningen og bærelinen er modellert i sikksakk om spormidt med $\pm 0,3$ meter som vist i figuren nedenfor.



Figur 4-9 Sikksakk sett i xy-planet

4.3.6 Modellering av oppløft på utliggeren

Lett direksjonsstag på utliggeren kan maksimalt løftes ca. 10 cm i z-retning i fra opprinnelig posisjon. Dette kriteriet ivaretaes ved at det settes en begrensning på kraften F_z i z-retning i kontaktpunktet mellom kontaktledningen og lett direksjonsstag. I det oppløftet overstiger 10 cm begrenses ytterligere oppløft ved å sette inn en negativ fjærkraft som virker nedover. Likningen for fjærkraften er:

$$F = -k * x \quad 4.19$$

For å simulere en rimelig stiv fjær settes fjærkonstanten k så høy som mulig.

Følgende uttrykk er brukt for å begrense direksjonsstagets oppløft:

$$(W \geq 0.1) * -1e9 * w \quad 4.20$$

Operatoren $W \geq 0.1$ uttrykker at dersom oppløftet blir mer en 0.1 m i z-retning så vil det etterfølgende uttrykk gjelde.

4.4 Modellering av strømvatager

Strømvatageren, WBL 88, beskrevet i kapittel 2.2 kan på en forenklet måte beskrives ved hjelp av ekvivalente masser som er tilkoblet via fjærer og dempere. Et system av differensiallikninger av andre orden beskriver disse komponentenes svingningsegenskaper. For å komme frem til denne modellen er det nødvendig å lage en analytisk modell av strømvatageren. Denne modellen kan integreres med kontaktledningssystemet som en ordinær differensiallikning (ODE) i Comsol eller ved å tegne strømvatagere i Comsol.

4.4.1 Antagelser og forutsetninger

Følgende antagelser og forutsetninger ligger til grunn for den forenklete modellen:

- Det er kun bevegelse i xz-planet
- Lengden på bølgen som genereres på kontaktledningen er større enn 5 meter

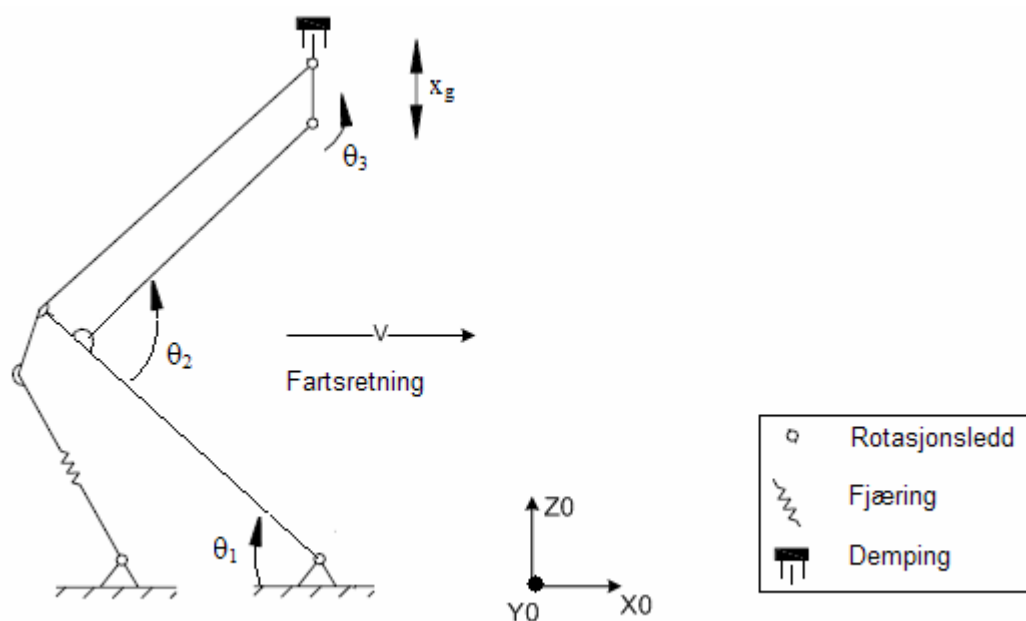
- De to kullstavene på toppstykket slås sammen til en kullstav
- Strømvatagerens referansepunkt er grunnrammen
- Høydeforandringen til strømvatageren beregnes ut i fra strømvatagerens massesenter
- Svingninger beregnes med utgangspunkt i stasjonær tilstand

4.4.2 Analytisk modell

Figur 4-10 viser en forenklet modell av strømvatageren vist i kapittel 2. Denne viser de rotasjonene og translasjonen som strømvatageren i prinsippet blir utsatt for.

Dette er den analytiske modellen for halvpanatograf strømvatagere med toppslepekull men tilpasset for strømvatageren WBL 88. Denne modellen har fire frihetsgrader som beskrevet i kapittel 9 i boken til [Kiessling,Puschmann,Schmieder,01]. Dette er vinkelendringene i nedre saksearm (θ_1), øvre saksearm (θ_2), toppstykket (θ_3) og den vertikale bevegelsen i fjæringen i toppstykket (x_g).

Som beskrevet i kapittel 1 og 2 i [Craig,95], kan translasjonene og rotasjonene til hvert element beskrives dersom det angis et basis koordinatsystem. Med basiskoordinataksene påført ser figuren slik ut.



Figur 4-10 Analytisk modell av strømvatageren

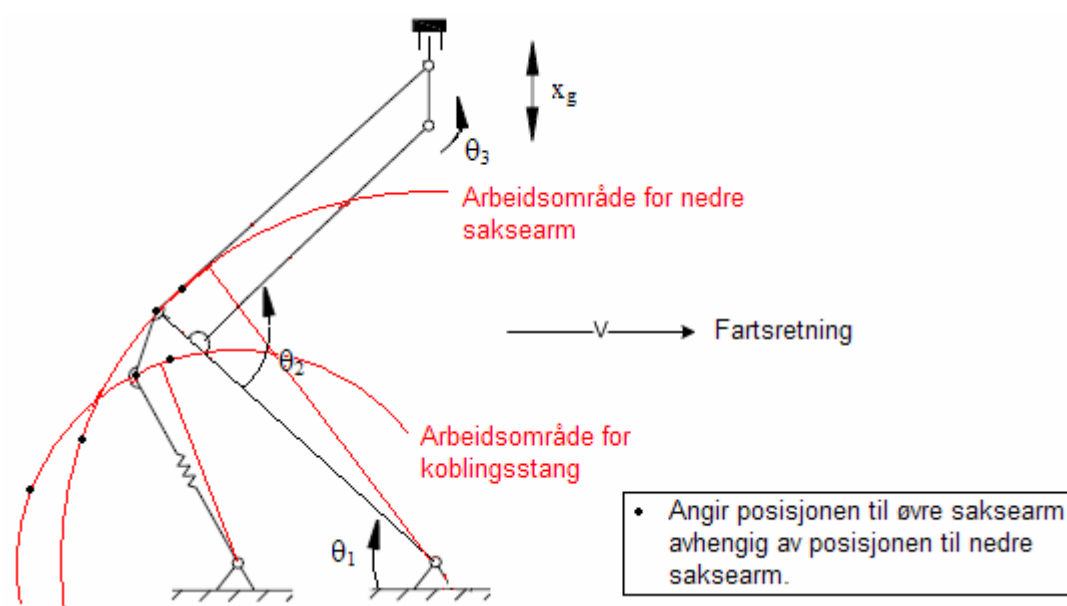
Basiskoordinatsystemet er knyttet til grunnrammen som strømvatageren er festet til og som sitter på taket av toget.

Retningen på de ulike bevegelsene:

- Strømvatageren beveger seg i x-retningen når toget settes i bevegelse
- Rotasjonene θ_1 , θ_2 og θ_3 foretas rundt y-aksen
- Translasjonen x_g foretas i z-retningen
- Sikksakk bevegelsen foregår i y-aksen

Beskrivelse	Vinkel
Vinkel mellom grunnramme og nedre saksearm	θ_1
Vinkel mellom nedre saksearm og øvre saksearm	θ_2
Vinkel mellom øvre saksearm og toppstykket	θ_3

Posisjonen til nedre saksearm gir posisjonen til øvre saksearm. Denne avhengigheten er beskrevet i Figur 4-11 som viser arbeidsområdene (røde kurver) til nedre saksearm og koblingsstaget. Rotasjonsleddet til øvre saksearm sitter i koblingen mellom øvre saksearm og koblingsstaget som vist i figuren og øvre saksearm har en fast vinkel på armen. Da nedre saksearm reiser seg opp vil koblingsstaget sørge for at øvre saksearm reiser seg fordi koblingsstaget er kortere enn nedre saksearm. Nedre del av øvre saksearm består i en fast vinkel og fast lengde og de svarte prikkene angir dens omtrentlig posisjon når koblingsstaget befinner seg i ulike posisjoner. Desto lenger til høyre i arbeidsområdet de svarte prikkene befinner seg, jo mer reiser strømvtageren seg.



Figur 4-11 Arbeidsområdet for koblingsstag og nedre saksearm

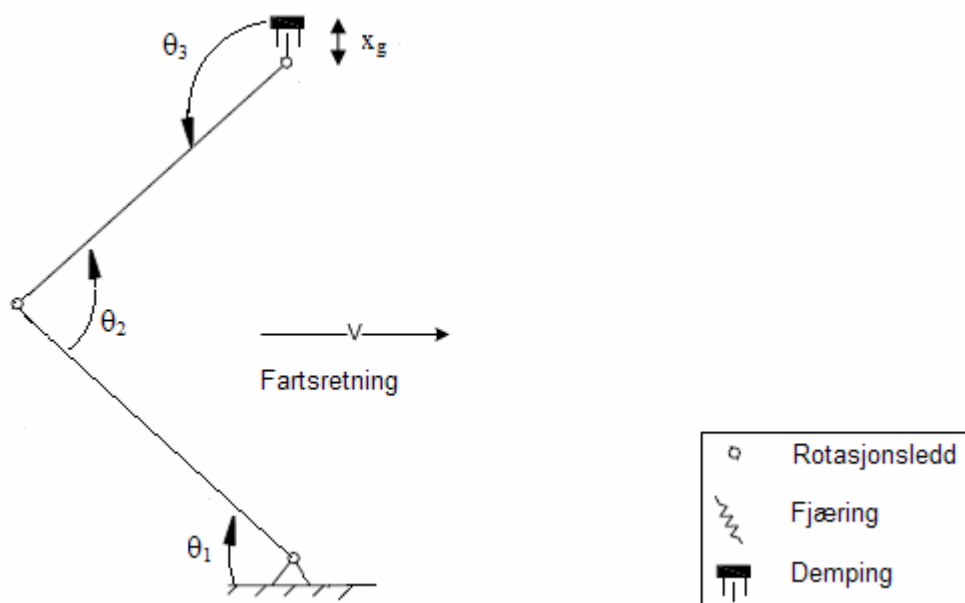
Vinkel θ_1 og θ_3 er tilnærmet lik like store da bevegelsene til ledd 1 og 3 er avhengige av hverandre. Toppstykket (ledd 3) vil tilstrebe en horisontal posisjon opp mot kontaktledningen.

Følgende mål er målt for hvert av elementene på strømvtageren på målevogn Roger 1000:

Del	Elementene	Lengde	Diameter
l_1	Nedre saksearm	1,6 m	85 mm
l_2	Koblingsstag	1,2 m	36 mm
l_3	Øvre saksearm	1,7 m	51 mm
l_4	Parallellføringsstag	1,68 m	6 cm
d	Avstand mellom koblingsstag og nedre saksearm	20 cm	

Basert på disse målene kan vinklene θ_2 og θ_3 settes opp som funksjon av vinkelen θ_1 , altså som $\theta_2(\theta_1)$ og $\theta_3(\theta_1)$, når vi vet at kontaktledningshøyden er 5,6 meter over skinneoverkant og strømvtagerens referansepunkt er grunnrammen til strømvtageren som befinner seg 4,4 meter over skinneoverkant.

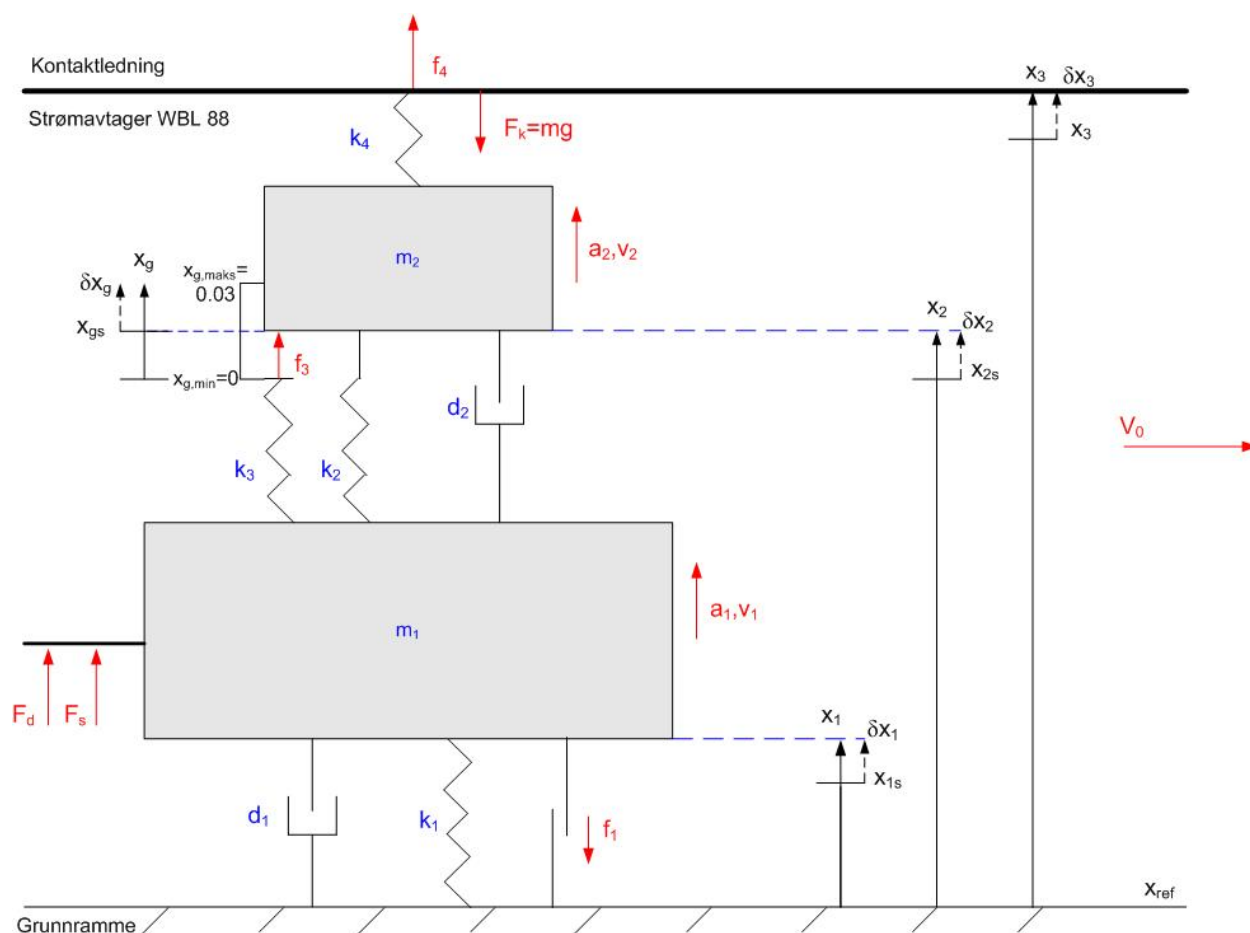
Figur 4-12 viser en forenklet analytisk modell.



Figur 4-12 Forenklet analytisk modell av strømvapteren

4.4.3 Matematisk modell av strømvapter

Den analytiske modellen i avsnitt 4.4.2 viser at strømvapteren WBL 88 kan beskrives ved hjelp av følgende 2-masse modell. Se Figur 4-13 samt matematisk modell for strømvaptere av type WBL i appendiks A. I denne oppgaven er navnene på parametrene omgjort for å beskrive dette systemet mest mulig logisk og for å bruke kjent anvendt matematikk. I denne oppgaven er det ønskelig å studere variasjonene som oppstår i z-retningen da strømvapteren er i oppreist posisjon og i bevegelse. Derfor vil modelleringen begrense seg til å ta for seg avviksmodellering. Utgangspunktet til strømvapteren er stasjonær tilstand i oppreist posisjon.



Figur 4-13 Matematisk modell av strømvatageren WBL 88.

Tabell 4-3 beskriver modellens fjærkonstanter, dempningsverdier og friksjonskonstanter som er skissert i Figur 4-13 og Tabell 4-4 beskriver de konstante og variable høydene.

Tabell 4-3 Dempningskonstanter, fjærkonstanter, krefter og masser for WBL 88

Del	Beskrivelse	Verdier	Enhet
d_1	Sekundærdempning (to svingedempere i nedre saksearm)	63.5	Ns/m
d_2	Primærdempning (to dempelementer i toppstykket som er slått sammen til en)	75.6	Ns/m
f_1	Sekundærfriksjon, saksemassens friksjon	17	N
f_3	Ulineær kraft mellom masse 1 og 2	Variabel	N
F_d	Aerodynamisk oppløftskraft	$0,00648 \cdot v^2$	N
F_s	Statisk oppløftskraft	55	N
k_1	Sekundærfriksjon (friksjonsfjæringen i luftbelgen)	1 000 000	N/m
k_2	Primærfjærer (to fjærer i toppstykket som er slått sammen til en)	4400	N/m
k_3	Ulineær fjæring mellom masse 1 og 2	1 000 000	N/m
k_4	Kontaktfjær mellom masse 2 og kontaktledningen	100 000	N/m
m_1	Massen til øvre og nedre saksearm også kalt sekundærmassen	19.7	Kg
m_2	Massen til kullstykkene som toppstykket består av, også kalt primærmassen	6.6	Kg
m_3	Massen til kontaktledningen ved simulering i Matlab	50	Kg

Tabell 4-4 Konstante og variable høyder

Del	Beskrivelse
x_1	Den totale høyden til masse 1 (stasjonær høyde + høydeforandringen)
x_2	Den totale høyden til masse 2 (stasjonær høyde + høydeforandringen)
x_{21f}	Fast høydeforskjell mellom masse 1 og masse 2
x_{32f}	Fast høydeforskjell mellom masse 2 og masse 3
x_{1s}	Høyden fra underkant nedre saksearm og ned til grunnrammen, ved stasjonær tilstand
x_{2s}	Høyden fra underkant toppstykke og ned til grunnrammen, ved stasjonær tilstand
x_{3s}	Høyden fra grunnrammen og opp til kontaktledningen når strømvatager er i oppreist posisjon (systemhøyde til kontaktledningen)
x_{ref}	Høyden i fra skinneoverkant og opp til grunnrammen til strømvatageren
x_{tak}	Høyden i fra skinneoverkant og opp til taket på toget
x_{maks}	Strømvatagerens maksimale arbeidshøyde med referanse i grunnrammen
x_{ramme}	Høyden på grunnrammen til strømvatageren
$x_{g,maks}$	Den maksimale grensehøyde
$x_{g,min}$	Den minimale grensehøyde
δx_1	Høydeforandringen til masse 1
δx_2	Høydeforandringen til masse 2
δx_3	Høydeforandringen til kontaktledningen
δx_g	Høydeforandringen til toppstykket

4.4.4 Differensiallikningene

Når strømvatageren settes i bevegelse med en fart v i x -retning vil kontaktkraften gi en løfting av kontaktledningen.

Kontaktkraften beskrives i [Sture,93] ved hjelp av følgende forenklede likning:

$$F_{tot} = F_s + F_d + M_{dyn} \omega^2 e \quad 4.21$$

Kreftene som virker i hvilke retninger:

- Statisk kraft $F_s=55\text{N}$ virker oppover og på m_1
- Aerodynamisk kraft F_d virker oppover på saksearmen
- Kontaktkraften F_4 virker nedover fra kontaktledningen og på m_2

Da systemet blir utsatt for disse kreftene vil massene 1 og 2 få høydeforandringer med utgangspunkt i stasjonær tilstand. Høyden (x_1) ved et gitt tidspunkt uttrykkes med utgangspunkt i stasjonær høyde (x_{1s}) og høydeforandringen (δx_1). Og tilsvarende gjelder for x_2 og x_3 . Dette kan uttrykkes på følgende måte:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{1s} + \delta x_1 \\ x_2 &= x_{2s} + \delta x_2 \\ x_3 &= x_{3s} + \delta x_3 \end{aligned} \quad 4.22$$

Bevegelsene til massesentrene til massene i Figur 4-13 kan beskrives ved hjelp av Newtons 2.lov:

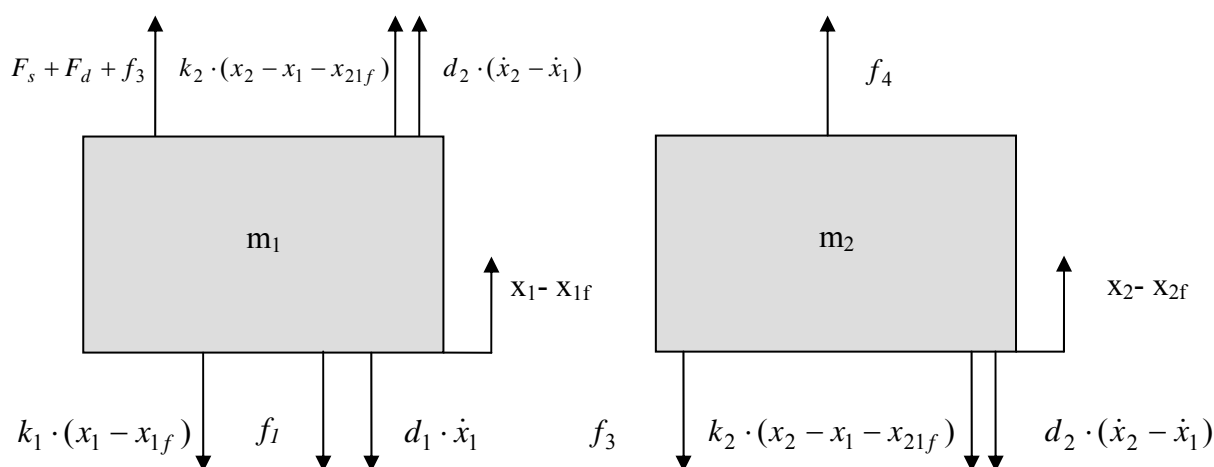
$$F = m * a = m * \frac{dv}{dt} = m * \frac{d^2 x}{dt^2} \quad 4.23$$

De absolutte kreftene på masse 1 og masse 2

Kreftene som virker på saksearmen (m_1) til strømvtageren når massene m_1 og m_2 beveger seg beskrives ved hjelp av en differensiallikning.

Figur 4-14 viser de variable kreftene som virker på masse 1 i tilfellene når masse 1 dyttes oppover og masse 2 holdes i ro og kreftene når masse 2 dyttes oppover og masse 1 er i ro. Det virker også tre konstante krefter på masse 1. Dette er f_1 , F_s og F_d . Den sistnevnte er konstant så lenge hastigheten er konstant.

Figur 4-14 viser også de variable kreftene som virker på masse 2 i tilfellene når masse 1 dyttes oppover og masse 2 holdes i ro, og deretter kreftene når masse 2 dyttes oppover og masse 1 er i ro.



Figur 4-14 De absolutte kreftene som virker på masse 1 og masse 2

Differensiallikningen for kreftene på masse 1 og 2 blir beskrevet som følgende med absolutte størrelser:

$$F_d + F_s + m_1 \ddot{x}_1 = k_2 \cdot (x_2 - x_1 - x_{21f}) + d_2 \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_1 \cdot (x_1 - x_{1f}) - d_1 \cdot \dot{x}_1 + f_1 \cdot \text{sign}(x_1) + f_3 \cdot (x_1, x_2) \quad 4.24$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -k_2 \cdot (x_2 - x_1 - x_{21f}) - d_2 \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - f_3(x_1, x_2) + f_4(x_2, x_3) \quad 4.25$$

Hvor:

- f_1 er en konstant kraft med skiftende fortegn mellom masse 1 og grunnrammen
- $f_3(x_1, x_2)$ er den ulineære kraften mellom masse 1 og 2
- $f_4(x_2, x_3)$ er kontaktkraften fra masse 3 på kontaktledningen

Retning og størrelser på disse kreftene er beskrevet mer detaljert nedenfor.

Friksjonskraften $f_1(x_1)$

Den kraften er avhengig av bevegelsesretningen til masse 1. Denne kraften er en friksjonskonstant og vil virke i motsatt retning av bevegelsesretningen. Den positive friksjonskraften har retning nedover.

Ulineær kraft $f_3(x_1, x_2)$

Den ulineære kraften f_3 er avhengig av x_1 og x_2 og kan ha tre ulike verdier. Verdien og retningen på denne kraften avhenger av hvor mye toppstykket trykkes ned eller dyttes opp. Høyden x_g er derfor også en funksjon av x_1 og x_2 og uttrykkes som $x_g(x_1, x_2) = x_2 - x_1 - x_{21f}$.

- Når $x_g \geq x_{g, maks}$

I de tilfeller hvor toppstykket blir dyttet opp til høyeste punkt i sitt bevegelsesrom blir kraften f_3 en negativ kraft nedover:

- Når $x_{g, min} < x_g < x_{g, maks}$

Den ulineære kraften, f_3 er lik 0 innenfor bevegelsesrommet til toppstykket som er på 3 cm.

- Når $x_g \leq x_{g, min}$

I de tilfeller hvor toppstykket blir trykt ned til laveste punkt i sitt bevegelsesrom blir kraften f_3 en positiv kraft oppover.

$$f_3(x_1, x_2) = \begin{cases} f_3 = -k_3 \cdot x_g : x_g = x_2 - x_1 - x_{21f} > x_{g, maks} \\ f_3 = 0 : x_{g, min} < x_g < x_{g, maks} \\ f_3 = k_3 \cdot x_g : x_g \leq x_{g, min} \end{cases} \quad 4.26$$

Interaksjonskraften $f_4(x_2, x_3)$

Interaksjonskraften f_4 utgjør i denne modellen interaksjonskreftene mellom strømvapteren og kontaktledningen og den er avhengig av høydeforandringen til x_2 og x_3 . Svingningene i kontaktledningen x_3 beskrives ved hjelp av en partiell differensiallikning i Comsol.

Kontaktkraften f_4 når toppstykket er i kontakt med kontaktledningen er proporsjonal med høydeforandringen mellom kontaktledningen og toppstykket. Kontaktkraften har positiv retning oppover som vist i Figur 4-13 å uttrykkes som følger med de absolutte størrelser:

$$f_4 = k_4 \cdot (x_3 - x_2 - x_{32f}) \quad 4.27$$

Kontaktkraften $F_{tot}(F_s, F_d, f_4)$

Kraften F_{tot} utgjør kontaktkraften mellom strømvapteren og kontaktledningen og er en summasjon av den statiske F_s , den aerodynamisk kraften F_d og interaksjonskraften f_4 .

4.4.5 Ulineær modellering

I følge læreboken til [Franklin, Powell, Naeini, 94] representerer de to differensiallikningene et ulineært system og kan skrives på følgende tilstandsform:

$$\dot{x} = f(x, u) = f(\delta x, \delta u)$$

Siden det er aktuelt med en avviks modellering er det nødvendig å bestemme balanseverdiene til x_s og u_s . Disse verdiene beregnes ved å sette $\dot{x}_s = 0 = f(x_s, u_s)$.

Likningene 4-24 og 4-25 får følgende uttrykk på ulineær tilstandsform:

$$\delta\ddot{x}_1 = \frac{(k_2 \cdot (x_{2s} + \delta x_2 - (x_{1s} + \delta x_1)) + d_2 \cdot (x_{2s} + \delta\dot{x}_2 - (x_{1s} + \delta\dot{x}_1)) - k_1 \cdot (x_{1s} + \delta x_1) - d_1 \cdot (x_{1s} + \delta\dot{x}_1) + f_1 \cdot \text{sign}(x_{1s} + \delta x_1) + f_3 \cdot (x_{1s} + \delta x_1, x_{2s} + \delta x_2) - F_d - F_s)}{m_1} \quad 4.28$$

$$\delta\ddot{x}_2 = \frac{(-k_2 \cdot (x_{2s} + \delta x_2 - (x_{1s} + \delta x_1)) - d_2 \cdot (x_{2s} + \delta\dot{x}_2 - (x_{1s} + \delta\dot{x}_1)) - f_3(x_1, x_2) + f_4(x_2, x_3))}{m_2} \quad 4.29$$

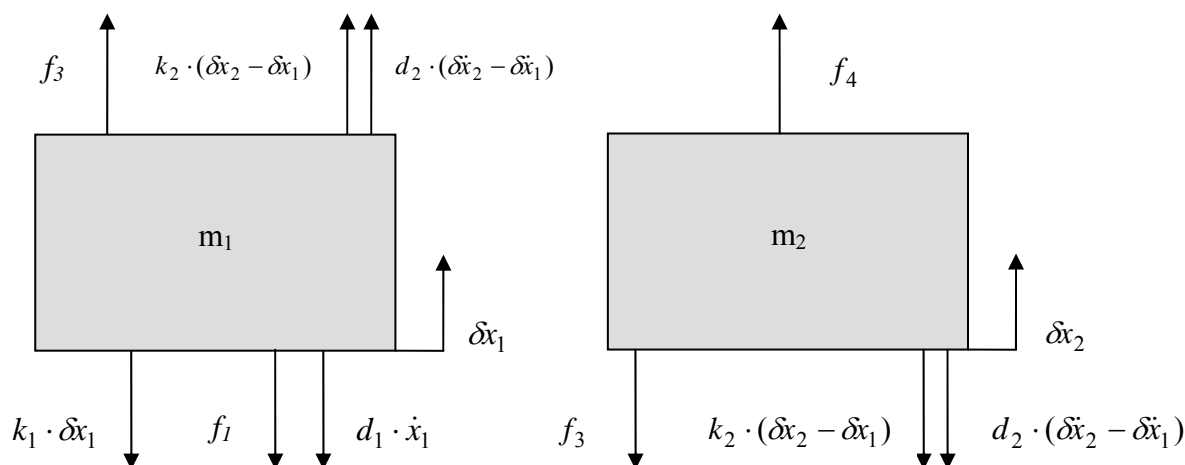
Hvor:

$$f_3(x_1, x_2) = \begin{cases} f_3 = -k_3 \cdot (\delta x_2 - \delta x_1 - \frac{1}{2} x_{g, maks}) : \delta x_g \geq x_{g, maks} \\ f_3 = 0 : x_{g, min} < \delta x_g < x_{g, maks} \\ f_3 = k_3 \cdot (\delta x_2 - \delta x_1) : \delta x_g \leq x_{g, min} \end{cases} \quad 4.30$$

$$f_4(x_2, x_3) = k_4 \cdot (\delta x_3 - \delta x_2) \quad 4.31$$

4.4.6 Avviksmodellering

Ved avviksmodellering faller alle konstante og stasjonære ledd bort. Uttrykkene omformes med hensyn på akselerasjonene for masse 1 og masse 2 sin bevegelse i z-retning.



Figur 4-15 Kreftene som virker på masse 1 og 2 under avviksmodellering

Den dobbeltderiverte av høydeforandringen δx_1 eller δx_2 beskriver akselerasjonen [m s^{-2}] til massene m_1 og m_2 . Den deriverte av høydeforandringen δx_1 eller δx_2 beskriver hastigheten [m s^{-1}] til massene. Dette problemet løses med referanse i massenes akselerasjonssystem.

Likning 4.28 og 4.29 får følgende uttrykk når alle stasjonære og konstante ledd faller bort.

$$\ddot{\delta x}_1 = \frac{k_2 \cdot (\delta x_2 - \delta x_1) + d_2 \cdot (\dot{\delta x}_2 - \dot{\delta x}_1) - k_1 \cdot \delta x_1 - d_1 \cdot \dot{\delta x}_1 + f_1(\delta x_1) + f_3(\delta x_1, \delta x_2)}{m_1}$$

Litt omformet:

$$\ddot{\delta x}_1 = \frac{-(k_2 + k_1) \cdot \delta x_1 + k_2 \cdot \delta x_2 - (d_1 + d_2) \cdot \dot{\delta x}_1 + d_2 \cdot \dot{\delta x}_2 + f_1(\delta x_1) + f_3(\delta x_1, \delta x_2)}{m_1} \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad 4.32$$

$$\ddot{\delta x}_2 = \frac{k_4 \cdot (\delta x_3 - \delta x_2) - (k_2 + k_3) \cdot (\delta x_2 - \delta x_1) - d_2 \cdot (\dot{\delta x}_2 - \dot{\delta x}_1) - f_3(\delta x_1, \delta x_2) + f_4(\delta x_2, \delta x_3)}{m_2}$$

Litt omformet:

$$\ddot{\delta x}_2 = \frac{k_2 \cdot \delta x_1 - k_2 \cdot \delta x_2 + d_2 \cdot \dot{\delta x}_1 - d_2 \cdot \dot{\delta x}_2 - f_3(\delta x_1, \delta x_2) + f_4(\delta x_2, \delta x_3)}{m_2} \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad 4.33$$

Ligningen 4.32 og 4.33 er avviksmodelleringen i form av en ordinær differensiallikning. Denne består av to annen ordens differensiallikninger.

4.4.7 Tilstandslikningen

Likningene 4.32 og 4.33, to annen grads likninger, kan hver skrives som to første ordens likninger. Totalt blir dette en likning med fire koblete differensiallikninger hvor x_3 er en pådragsvariabel til den partielle differensiallikningen.

$$\dot{\delta x}_1 = v_1$$

$$\dot{\delta x}_2 = v_2$$

$$\dot{\delta x}_1 = \dot{v}_1 = \frac{-(k_2 + k_1) \cdot \delta x_1 + k_2 \cdot \delta x_2 - (d_1 + d_2) \cdot \dot{\delta x}_1 + d_2 \cdot \dot{\delta x}_2 + f_1(\delta x_1) + f_3(\delta x_1, \delta x_2)}{m_1}$$

$$\dot{\delta x}_2 = \dot{v}_2 = \frac{k_2 \cdot \delta x_1 - k_2 \cdot \delta x_2 + d_2 \cdot \dot{\delta x}_1 - d_2 \cdot \dot{\delta x}_2 - f_3(\delta x_1, \delta x_2) + f_4(\delta x_2, \delta x_3)}{m_2}$$

I tilfellet hvor x_3 er en pådragsvariabel til den partielle differensiallikning kan dette omformes til fire koblete differensiallikninger. På nedre kontroll kanoniske form blir dette uttrykt på følgende måte.

$$\begin{bmatrix} \ddot{\delta x}_1 \\ \ddot{\delta x}_2 \\ \dot{v}_1 \\ \dot{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-(k_2 + k_1)}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & \frac{-(d_1 + d_2)}{m_1} & \frac{d_2}{m_1} \\ \frac{k_2}{m_2} & \frac{-(k_2 + k_4)}{m_2} & \frac{d_2}{m_2} & \frac{-d_2}{m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_4}{m_2} \end{bmatrix} \delta x_3 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_1} \\ 0 \end{bmatrix} f_1(\delta x_1) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_1} \\ -\frac{1}{m_2} \end{bmatrix} f_3(\delta x_1, \delta x_2) \quad 4.34$$

Dette problemet løses ved å bruke initialverdiene for høydeforandringen samt den deriverte av høyden ved $t=0$:

$$\delta x_0 = [\delta x_{10} \quad \delta x_{20} \quad v_{10} \quad v_{20}] = [\delta x_{10} \quad \delta x_{20} \quad 0 \quad 0] \quad 4.35$$

I tilfellet hvor kontaktledningen modelleres som en masse 3 angir x_3 høyden til kontaktledningen. Tilstandslikningen blir en likning med seks koblete differensiallikninger. På nedre kontroll kanoniske form blir dette uttrykt på følgende måte.

$$\begin{bmatrix} \ddot{\delta x}_1 \\ \ddot{\delta x}_2 \\ \ddot{\delta x}_k \\ \dot{v}_1 \\ \dot{v}_2 \\ \dot{v}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-(k_2+k_1)}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & 0 & \frac{-(d_1+d_2)}{m_1} & \frac{d_2}{m_1} & 0 \\ \frac{k_2}{m_2} & \frac{-k_2-k_4}{m_2} & \frac{k_4}{m_2} & \frac{d_2}{m_2} & \frac{-d_2}{m_2} & 0 \\ 0 & \frac{k_4}{m_3} & \frac{-k_4}{m_3} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \delta x_3 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f_1(\delta x_1) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_1} \\ \frac{1}{m_2} \\ 0 \end{bmatrix} f_3(\delta x_1, \delta x_2) \quad 4.36$$

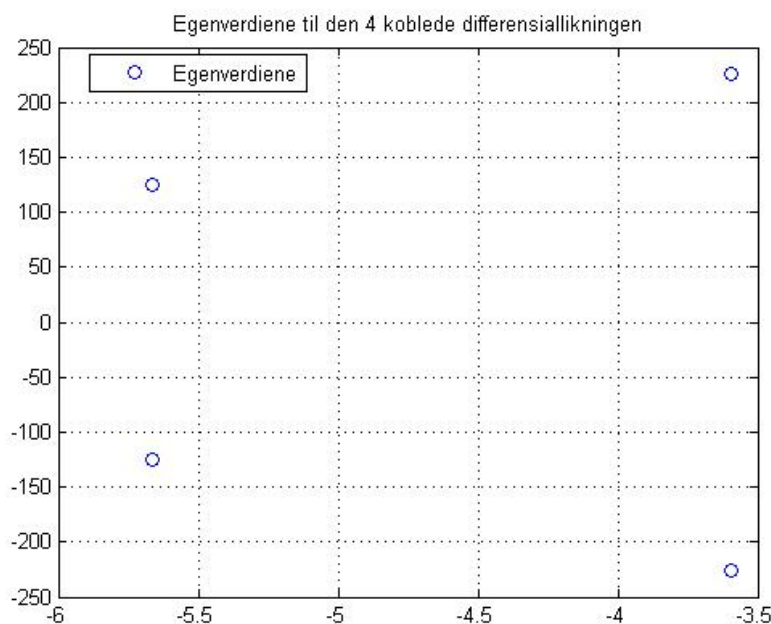
Dette problemet løses ved å bruke initialverdiene for høydeforandringen samt den deriverte av høyden ved $t=0$:

$$\delta x_0 = [\delta x_{10} \quad \delta x_{20} \quad \delta x_{k/0} \quad \dot{\delta x}_{10} \quad \dot{\delta x}_{20} \quad \dot{\delta x}_{k/0}] = [\delta x_{10} \quad \delta x_{20} \quad \delta x_{k/0} \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad 4.37$$

4.5 Modellering av strømvtageren i Matlab

Likningene for avviksmodellen i avsnitt 4.4.7 er implementert i Matlab og koden finnes i appendiks F. På bakgrunn av tilstandsformen som er beskrevet i avsnitt 4.4.7 kan vi finne egenverdiene til systemet. Det er interessant å studere plasseringen av egenverdiene både for fire og seks koblete differensiallikninger, for å se om systemet er stabilt. Siden dette er en tilstandsform for små endringer/avvik, er alle konstante verdier utelukket og dette gjelder kreftene f_1 , F_s og F_d .

For fire koblete differensiallikninger er egenverdiene plassert som vist i Figur 4-16.

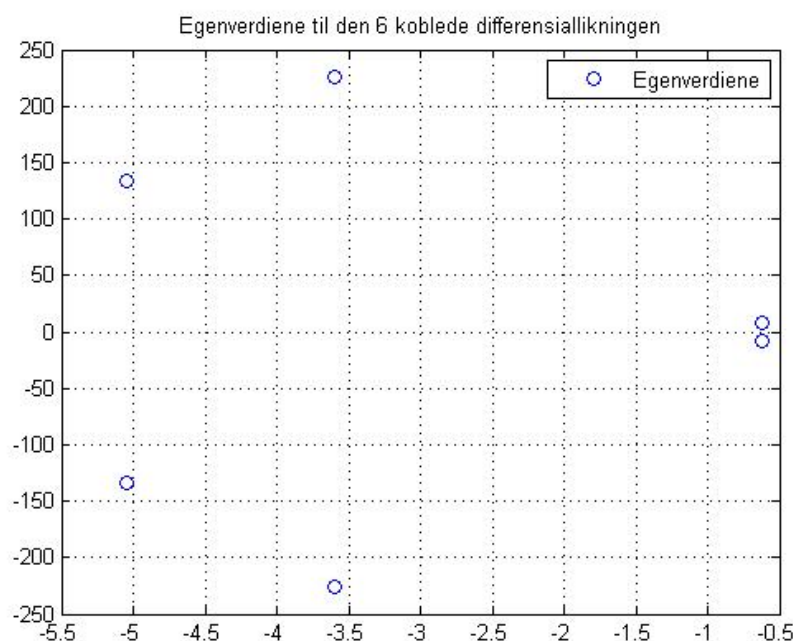


Figur 4-16 Systemets egenverdier med fire koblede differensiallikninger

Egenverdiene viser tydelig at systemet uten ulineært bidrag, er stabilt. Egenverdiene ligger i venstre halvplan og er som følger:

$$Eig(A) = 100 \cdot \begin{bmatrix} -0.0360 + 2.2564i \\ -0.0360 - 2.2564i \\ -0.0566 + 1.2571i \\ -0.0566 - 1.2571i \end{bmatrix}$$

For seks koblede differensiallikninger er egenverdiene plassert som vist i Figur 4-17.



Figur 4-17 Systemets egenverdier med seks koblede differensiallikninger

$$Eig(A) = 100 \cdot \begin{bmatrix} -0.0360 + 2.2563i \\ -0.0360 - 2.2563i \\ -0.0504 + 1.3312i \\ -0.0504 - 1.3312i \\ -0.0062 + 0.0863i \\ -0.0062 - 0.0863i \end{bmatrix}$$

Egenverdiene for begge systemene viser at det ikke er stor spredning da det er mindre enn en faktor på 10 mellom den raskeste (-3,56) og langsomste (-0,62) egenverdien.

Komplekse poler kan defineres ved hjelp av en reell og imaginær del som uttrykkes som følger:

$$s = -\sigma \pm j\omega_d$$

Hvor:

σ = dempningen
 ω_d = frekvensen

På bakgrunn av dette kan frekvensen for de ulike egenverdiene beregnes. I følge avsnitt 3.3 i læreboken til [Franklin,Powell,Naeini,94] kan følgende ligninger brukes:

$$\sigma = \frac{1}{\tau} \quad \text{og} \quad \omega_d = 2\pi f$$

For $s = -3.6 \pm j225.63$ og $s = -5.6 \pm j125.71$ er τ og f gitt ved følgende likninger:

$$\tau = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{3.6} = 0.277 \quad f = \frac{\omega_d}{2\pi} = \frac{225.63}{2\pi} = 35.9$$

$$\tau = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{5.6} = 0.17 \quad f = \frac{\omega_d}{2\pi} = \frac{125.71}{2\pi} = 20$$

4.6 Modellering av strømvatageren i Comsol

Strømvatageren er definert under "physics" i Comsol som en ordinær differensiallikning (ODE). Mens kontaktledningssystemet er beskrevet som en partiell differensiallikning (PDE) gjennom "Finite Element Method". Den ordinære differensiallikningen er avhengig av å vite høydeendringen til kontaktledningen for å beregne høydeendringen til masse 1 og 2 i strømvatageren.

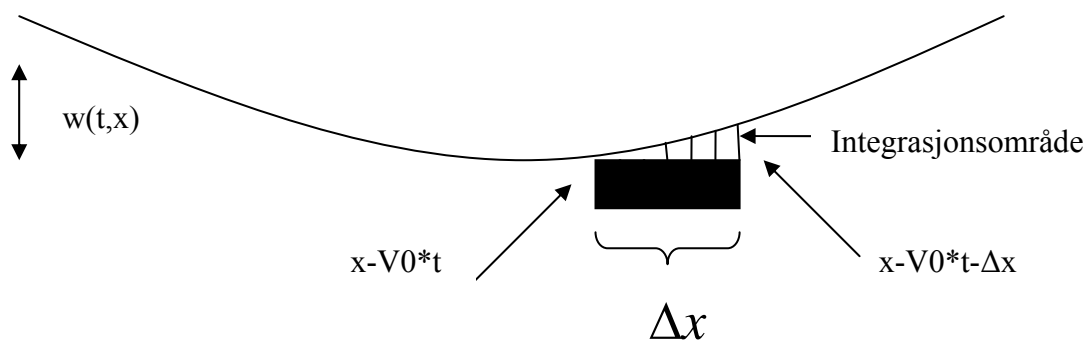
Høydeforandringen på kontaktledningen (i den partielle differensial likningen) i et gitt punkt kan leses ut automatisk ved å foreta en integrasjon over kullstiftens bredde, Δx til en hver tid. Ved å integrere opp høydeforandringen 'w(t,x)' i et linjestykke som uttrykkes ved hjelp av Heavisideuttrykket $H(x-V_0 \cdot t, x-V_0 \cdot t - \Delta x)$ oppnås benevnelsen areal. For å finne den gjennomsnittlige verdien til 'w(t,x)' i dette området, divideres dette arealet med lengden til linjen, Δx . Denne linjen uttrykker bredden til kullstiften som er ca. 4 cm (0.04 m) bred. Den gjennomsnittlige verdien av 'w(t,x)' i et punkt tilsvarer verdien 'w₃(t,x)' i et punkt gitt at 'w(t,x)' er tilnærmet konstant der strømvatageren står.

$$\text{Integralet er som følger: } \frac{1}{\Delta x} \int_0^{\Delta x} w(t, x) \cdot H(x - V_0 \cdot t, x - V_0 \cdot t - \Delta x) = w_3(t, x) \quad 4.38$$

Det blir gjort en integrasjon av 2. orden og da blir likningen som følger:

$$\frac{1}{\Delta x} \cdot \frac{1}{2} w(t, x)^2$$

Figur 4-18 viser en prinsipptegning av hvordan integrasjonsområdet over strømvatageren kan se ut.



Figur 4-18 Integrasjonsområdet over strømvavtageren

Følgende er definert under "options" i Comsol:

Integrasjonskonstanten "intw" langs kontaktledningen skal beregne middelverdien til høydeforandringen på det stedet hvor strømvavtageren til en hver tid befinner seg. Denne er definert under "edge integration variables".

Edge integration variables		
Navn (u)	Expression	Integration order
Intw	$w*(\text{flc2hs}(x-V0*t,dx)-\text{flc2hs}(x-(V0*t+dx),dx))/dU$	2

Kreftene som inngår i den ordinære differensiallikningen f_{11} , f_3 og f_4 er definert under "global expressions".

Global expression	
Navn (u)	Expression
dx3	intw
dx5	$dx2-dx1$
f11	$-f_1*(v1>0)+0*(v1==0)+f_1*(v1<0)$
f3	$k3*(dx5-0.015)*(dx5\geq 0.015)+0*(-0.015<dx5<0.015)-k3*dx5*(dx5\leq -0.015)$
f4	$k4*(dx3-dx2)$
Fsd	$Fs+f4$

Følgende er definert under "physics" i Comsol. De ordinære differensiallikningene 4.32 og 4.33 beskrives på følgende måte i "global equations":

Global equations			
Navn (u)	Likning	Initial verdi (u)	Initial verdi (ut)
dx1	$dx1t-v1$	0	0
dx2	$dx2t-v2$	0	0
v1	$v1t-(-(k2+k1)*dx1+k2*dx2-(d1+d2)*dx1t+d2*dx2t+f11+f3)/m1$	0	0
v2	$v2t-(k2*dx1-(k2+k4)*dx2+d2*dx1t-d2*dx2t)+k4*dx3+f3)/m2$	0	0

Høydeforandringen til $dx1$ og $dx2$ har opprinnelig verdi lik 0 og tilsvarende verdi er utgangspunktet for hastighetsforandringen til hver av massene.

Fz beskriver tyngdekraftene til kontaktledningen og de kreftene som virker fra strømvatageren ($F_s - f_4 + F_d$) og opp mot kontaktledningen. Enheten til Fz er [N/m]. For å få denne enheten må $F_s - f_4 + F_d$ divideres med bredden på kullstiften.

Edge settings	
Navn (u)	Expression
Fz	$-g_c \cdot \rho_{\text{smtr3d}} \cdot A_{\text{smtr3d}} + (F_s - f_4 + F_d) \cdot (\text{flc2hs}(x - V_0 \cdot t, dx) - \text{flc2hs}(x - (V_0 \cdot t + dX), dx)) / dU$

I appendiks H finnes kildekoden og en veiledning til konfigurasjon av 3D-modellen i Comsol.

4.6.1 Modellering av punktkraften ved hjelp av Heavisidefunksjonen

De totale kontaktkreftene, F_{tot} , simulerer kraften fra strømvatageren på kontaktledningen og visualiseres ved hjelp av en bevegelig kraft. Strømvatageren beveger seg med en gitt hastighet og har et kraftområde på ca. 0,6 meter. Oppløftkraften til strømvatageren simuleres som en stepfunksjon. I Comsol benyttes en glatt Heavisidefunksjon med en kontinuerlig 2. derivativ $\text{flc2hs}()$ for å simulere en strømvatager som beveger seg med hastigheten v . Det er ønskelig at dette uttrykket skal foreta et "step" i z-retningen. Uttrykkets funksjon (X, scale) er å glatte overgangen innenfor et gitt intervall. Den sier noe om hvor bred pulsen skal være og hvor fort den skal stige fra 0 til 1. Denne ligningen er som vist nedenfor.

$$H(x) = \int_{-\infty}^x \delta(t) - \int_x^{\infty} \delta(t) \quad 4.39$$

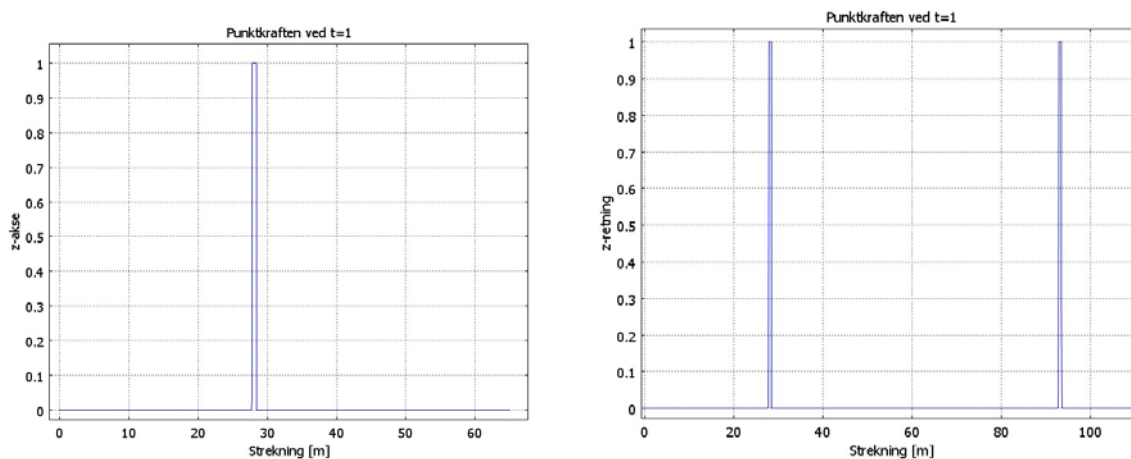
Dette uttrykkes på følgende måte i Comsol:

$$\text{flc2hs}(x - V_0 \cdot t, dx) - \text{flc2hs}(x - (V_0 \cdot t + dX), dx) \quad 4.40$$

Hvor:

- Flc2hs er den kontinuerlige 2. deriverte
- dx angir innen hvilket intervall transisjonen skal foregå
- dX er pulsens bredde, og dette tilsvarer avstanden mellom kullstykkene på strømvatageren som trykker mot kontaktledningen.

Stepfunksjonen for en og to strømvatagere blir som vist i *Figur 4-19*.



Figur 4-19 Stepfunksjonen for 1 og 2 strømvatagere

4.6.2 Modellering av strømvapterne

Kraften F_{tot} tilsvarer den kraften som strømvapteren påtrykker kontaktledningen i z-retning. I denne oppgaven ser vi bort i fra krefter som virker i sideretningen og setter F_x og F_y lik 0.

Avstanden mellom kullstykkene er på omtrent 60 cm og tilsvarer utbredelsen dx av kraften F_{tot} . Kreftene som virker i z-retning når en strømvapter forflytter seg er:

- Kontaktledningens gravitasjonskraft g_c som virker nedover
- De totale kontaktkreftene F_{tot} som virker oppover

Likningen 4.21 er brukt og for dette systemet tilsvarer dette:

$$F_{tot} = 55 + 0,00648 \cdot v^2 + f_4 \quad 4.41$$

Hvor:

$$F_s = 55[N]$$

$$F_d = 0,00648 \cdot v^2[N]$$

Interaksjonskraften f_4 uttrykkes ved hjelp av den matematiske modellen for strømvapteren definert i kapittel 4.4.7.

Likningen for kraften i z-retning uttrykt ved F_{tot} er som følger for 1 strømvapter:

$$F_z = F_{tot} * (flc2hs(x - V_0 * t, dx) - flc2hs(x - (V_0 * t + dX), dx)) \quad 4.42$$

For å modellere to strømvaptere med et gitt mellomrom er det nødvendig å definere et sett ekstra med ordinære differensiallikninger samt at det er nødvendig å legge til en punktkraft F_{tot} som virker 65 meter bortenfor den andre punktkraften.

Likningen for kraften i z-retning uttrykt ved F_{tot} er som følger for strømvapter nummer 2:

$$F_z = F_{tot} * flc2hs(x - 65 - V_0 * t, dx) - flc2hs(x - 65 - (V_0 * t + dX), dx) \quad 4.43$$

4.7 Modellering av FEM elementene

For bærelinen og kontaktledningen er det brukt en "Free Mesh Parameters". Når det opprettes en "Free Mesh" vil antallet maskeelementer bestemmes ut i fra formen på kontaktledningen og bærelinen. Størrelsen på et maskeelement må ikke være større enn det minste lokale elementets størrelse som bestemmes av alle maskene.

I denne modellen er parameteren "Maximum element size" for kontaktledning og bæreline satt med hensyn til bredden mellom de to kullstykkene på strømvapteren som er 0,67 meter. Det var nødvendig å velge en verdi som var lavere enn dette for å kunne gjøre nøyaktige simuleringer av kontaktkreftene i dette området. Det blir utført en integrasjon i området mellom disse kullstykkene. Beregningen av denne integrasjonen går på bekostning av tiden dersom maskeverdien ligger for tett opp til 0,67. Derfor resulterte det etter flere forsøk med at denne verdien ble satt til 0,03.

4.8 Oppsummering av modelleringen

Innledningsvis ble det laget en forenklet modell av kontaktledningssystemet ved hjelp av "Finite Element Method". Videre ble det laget en forenklet modell av strømvtageren. En modell for bevegelse av strømvtageren ble beskrevet ved hjelp av fire koblede differensiallikninger.

Det ble laget to modeller.

- en modell med en strømvtager
- en modell med to strømvtagere (avstand på 30 og 65 meter)

Disse modellene er modellert kvasi-statisk. Det vil si at systemet ikke er fullstendig dynamisk modellert. Det aerodynamiske bidraget til strømvtageren er tilnærmet en teoretisk verdi. WBL 88 har definert et aerodynamisk bidrag på $0,00648 * v^2$.

Avslutningsvis ble det beskrevet hvordan modellene ble implementert i Matlab og Comsol. En veiledning for koding og modellering finnes i appendiks H.

For å studere kontaktkreftene mellom strømvtager og kontaktledning må strømvtageren være i bevegelse. Det er valgt å modellere 3 spenn hvorav hvert spenn er 65 meter langt. Effekten av utbredelsen av de transversale bølgene vil kunne studeres best i spenn tre. Strømvtageren har en konstant hastighet på 100 km/h. Fra strømvtageren starter til den har passert 3. spenn (195 meter) tar det ca. 7 sekunder.

5 Simulering/Resultat

5.1 Bakgrunn

Hensikten med simuleringene er å studere hvordan kraftbildet endres når hastigheten for en strømvatager blir endret og når avstanden mellom to strømvatagere blir endret. Videre er hensikten å få innsikt i hvilke parametere som i vesentlig grad påvirker godheten når det gjelder strømvataking.

Samvirkningen mellom kontaktledning og strømvatager kan først og fremst evalueres på bakgrunn av kontaktkreftene og oppløftet. Oppløftet bør være så lite som mulig og kreftene bør på strekninger med strekningshastighet ≤ 160 km/h være innenfor F_{maks} og F_{min}

- $F_{\text{maks}} \leq 120\text{ N}$
- $F_{\text{min}} \geq 20\text{ N}$

5.2 Valg av toghastighet og andre parametere

System 20 B er et standard kontaktledningsnett for nye anlegg og ved fornyelse av eldre anlegg. Strekningshastigheten er ≤ 160 km/h. Oppløftet til kontaktledningen er avhengig av hastigheten til toget og den aerodynamiske kraften fra strømvatageren. Det er derfor ønskelig å se at simuleringssmodellen håndterer dette. Det er valgt å simulere følgende toghastigheter: 100 km/h, 130 km/h og 160 km/h. 100 km/h ble valgt som utgangssimulering, 130 km/h ble valgt fordi dette er snitthastigheten på vanlige konvensjonelle baner med enkeltsporet drift og 160 km/h er maksimalhastigheten på dette kontaktledningssystemet. Denne hastigheten er ofte brukt på dobbeltsporet strekning. Tabell 5-1 viser tidspunktene ved passering av utligger 2-4 ved forskjellige hastigheter.

Tabell 5-1 Tidspunkt ved passering av utliggerne 2, 3 og 4 ved ulike hastigheter

Hastigheter (V)	Tid ved 65 m Utligger 2	Tid ved 130 m Utligger 3	Tid ved 195 m Utligger 4
100 km/h	2,34 s	4,68 s	7,02 s
130 km/h	1,8 s	3,6 s	5,4 s
160 km/h	1,46 s	2,93 s	4,39 s

Ved simulering av to strømvatagere etter hverandre ved tilsvarende hastigheter, er det gjort simuleringer hvor strømvatageravstanden er 65 eller 30 meter. Disse simuleringene er gjort for å se hvordan avstanden mellom strømvatagerne påvirker kreftene på strømvatager nummer to ved forskjellige hastigheter.

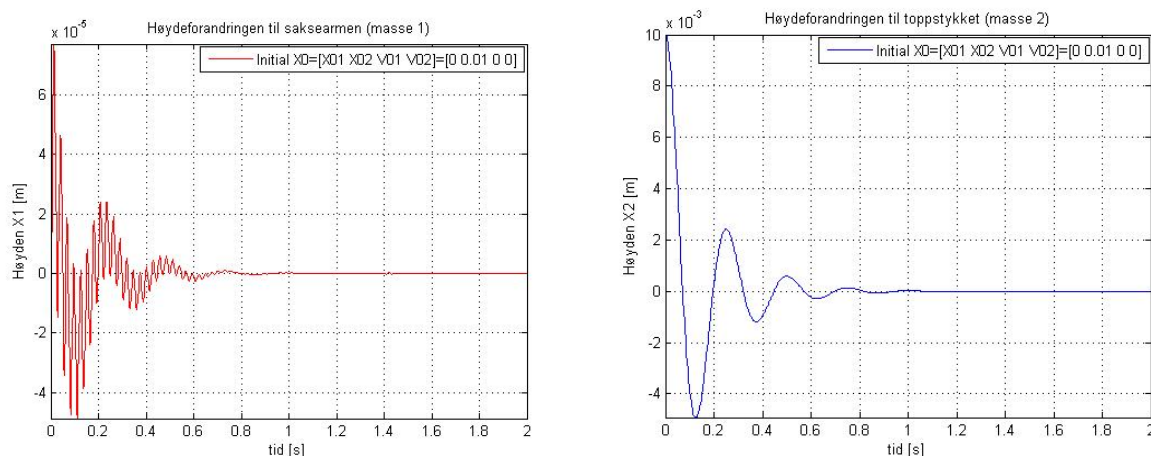
5.3 Simulering av strømvatageren i Matlab

Det er ønskelig å studere oppførselen til strømvatageren når den er i ro ($v=0$ km/h), har påtrykt en statisk kraft (55 N) og når toppstykket blir løftet en gitt høyde opp før den slippes. Denne simuleringen blir gjort i Matlab. Hensikten med denne simuleringen er å verifisere at systemet er stabilt, ved at strømvatageren svinger seg inn igjen til stasjonær tilstand. Bevegelsen til saksemassen (masse 1) og toppstykket (masse 2) i z-retning simuleres ved å gi et lite bidrag til toppmassen (masse 2) skissert i Figur 4-13.

5.3.1 Fire koblede differensiallikninger

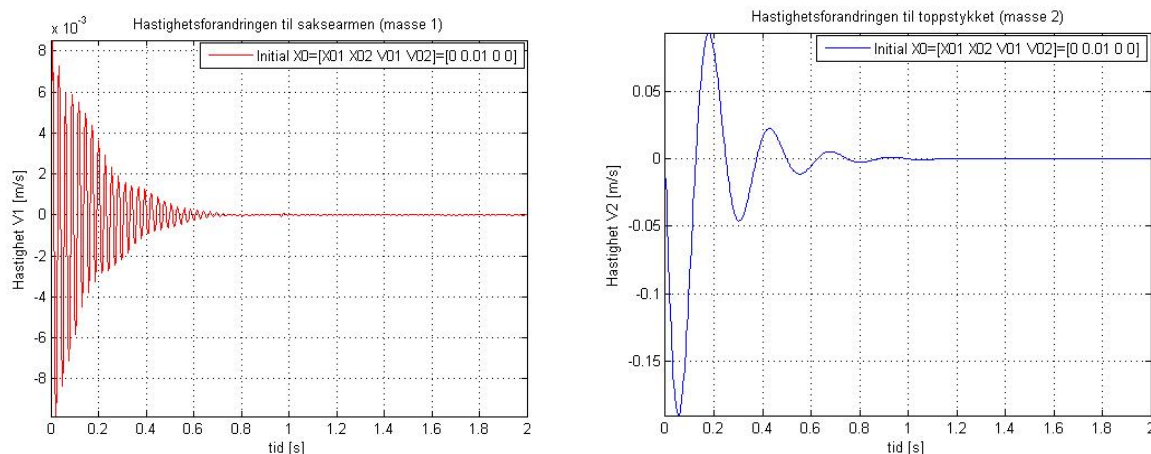
Det ble først gjort en simulering av fire koblede differensiallikninger (uten interaksjon med kontaktledningen) presentert i avsnitt 4.4.7. Figurene på de neste sidene viser høydeforandringen

og den vertikale hastigheten til saksemassen og toppstykket når toppstykket blir løftet opp med 1 cm initiert med følgende initialverdier $[\delta x_1 \quad \delta x_2 \quad v_1 \quad v_2] = [0 \quad 0.01 \quad 0 \quad 0]$.



Figur 5-1 Høydeforandringen til saksemassen (masse 1) og toppstykket (masse 2)

Figurene av høydeforandringen viser at saksemassen har små høydebevegelser i forhold til toppstykket. Dette stemmer med at saksemassen er en stivere masse enn toppstykket. Saksemassen har maksimalt utslag på $8 \cdot 10^{-5}$ meter, mens toppstykket har maksimalt utslag på 0,01 meter som er det opprinnelige bidraget. Massene har samme bevegelsesmønster, men de har ulik frekvens og bevegelsen til saksemassen er dempet i forhold til toppstykkets bevegelse. Toppstykket svinger seg inn mot stasjonær tilstand i fra utslaget på 1 cm med en lavere frekvens enn det saksemassen gjør.



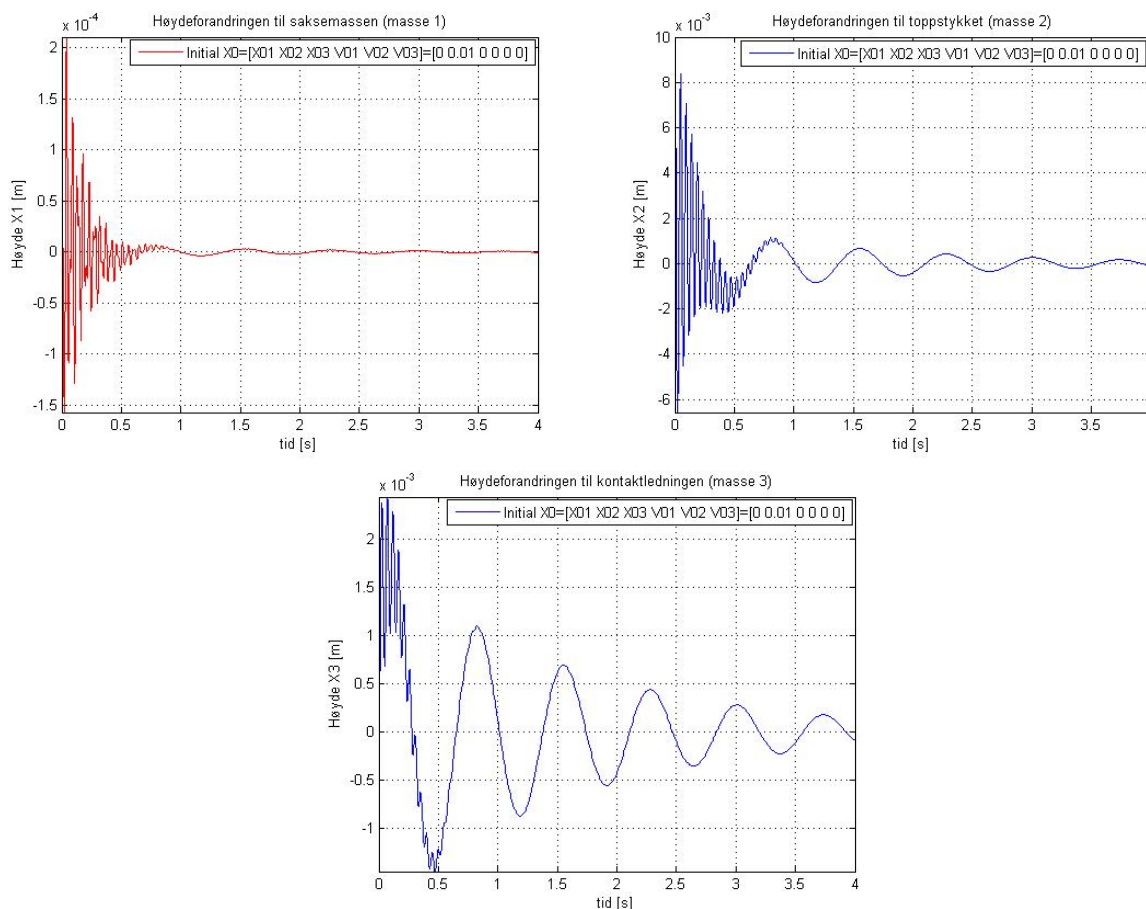
Figur 5-2 Vertikal hastighet til saksemassen (masse 1) og toppstykket (masse 2)

Figurene av de vertikale hastighetene i z-retning, viser at hastigheten til saksemassen er maksimalt 0,008 m/s og at den svinger seg inn mot 0 m/s med høy frekvens i løpet av 0,8 sekunder. Hastigheten til toppstykket er mye større og er maksimalt ca. 0,2 m/s. Toppstykket svinger seg inn med en lavere frekvens i løpet av samme tid som toppstykket.

5.3.2 Seks koblede differensiallikninger

Effekten av kontaktledningen simuleres som en masse og Figur 4-15 blir i stedet en tremassemodell som gir seks koblede differensiallikninger i Matlab som beskrevet i ligning 4.36. Hensikten med denne simuleringen er å studere oppførselen til strømvtageren når den påvirkes av tyngdekraften til kontaktledningen. Ellers gjelder de samme prinsippene som beskrevet i

avsnitt 5.3.1. Figurene nedenfor viser simuleringer for initialverdiene $[\delta x_1 \ \delta x_2 \ \delta x_3 \ v_1 \ v_2 \ v_3] = [0 \ 0.01 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$



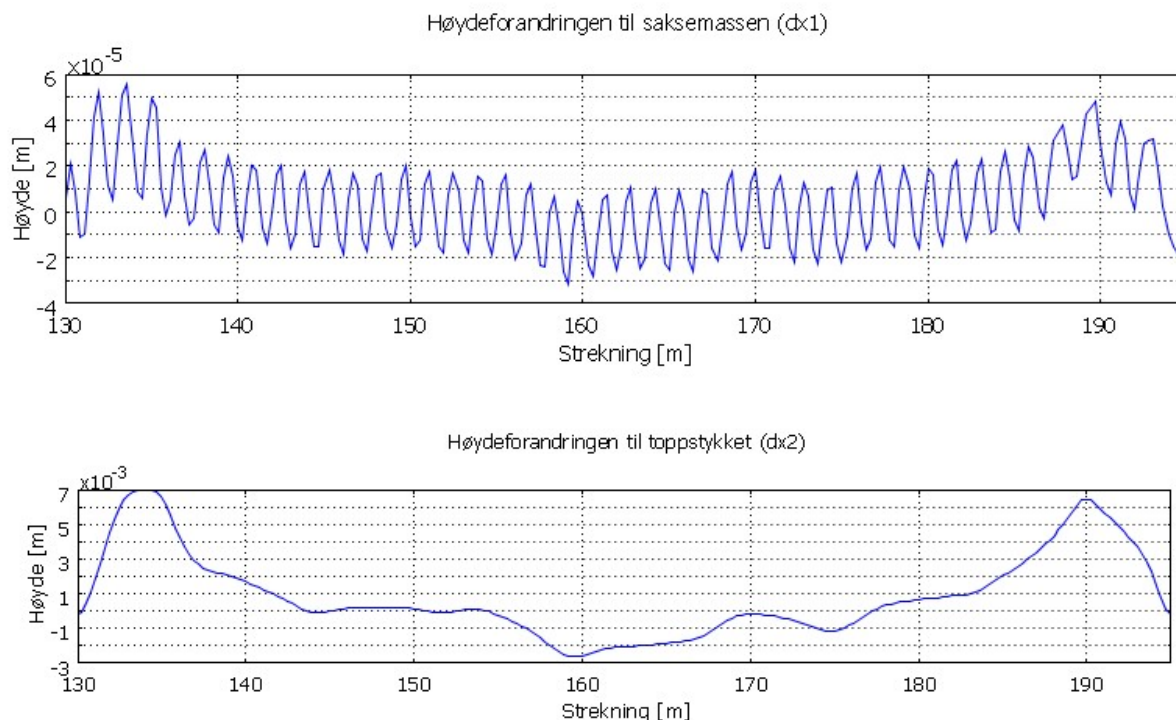
Figur 5-3 Høydeforandringen til saksemassen (masse 1), toppstykket (masse 2) og kontaktledningen (masse 3)

Figurene av høydeforandringen viser at saksemassen fortsatt har små høydebevegelser i forhold til toppstykket. Men de er likevel litt større enn i den forrige modellen. Dette er et resultat av at masse tre samvirker med strømvtageren. Saksemassen har maksimalt utslag på $2 \cdot 10^{-4}$ meter, mens toppstykket har maksimalt utslag på 0,01 meter som er det opprinnelige bidraget. Bevegelsesmønster til massene er fortsatt ganske likt, men nå svinger massene med samme frekvens og tiden for innsvingning har økt.

Det er vanskelig å verifisere disse simuleringene mot målinger av en reell strømvtager da slike målinger ikke foreligger. Men på bakgrunn av informasjon om tiden for innsvingning, massenes frekvens, saksemassens og toppstykkes bevegelsesmønster synes modellen av strømvtageren å stemme.

5.4 Simulering av strømvtageren i Comsol

Det er også ønskelig å studere oppførselen til strømvtageren når den er i bevegelse ($v=100$ km/h) og blir utsatt for de totale kreftene ($F_s=55$, $F_d=0,00648 \cdot V^2$ og f_4) mellom kontaktledningen og strømvtageren. Denne simuleringen skiller seg fra den gjort i Matlab ved at strømvtageren er i bevegelse og at den hele tiden vil bli utsatt for krefter slik at den ikke vil svinge seg inn mot sin stasjonære verdi så lenge toget er i bevegelse.



Figur 5-4 Høydeforandringen til saksemassen og toppstykket

Simuleringene viser at svingningene til sakemassen og toppstykket ligger innenfor de verdiene som er vist i Matlabsimuleringene i kapittel 5.3. I tillegg viser de hvordan strømvatageren trykkes nedover etter hvert som kontaktledningen henger mer og mer ned. Vi ser også at strømvatageren løfter kontaktledningen mest over 0-nivå når den er i nærheten av utliggerne og at løftet er minimalt på utligger. Av figuren til saksemassen ser vi også at den har en frekvens på ca. 20 Hz. Dette tilfredsstiller kravet fra [Jernbaneverket,1999] om at egensvingningsfrekvensen til strømvatageren skal være større enn 15 Hz.

Figuren av saksemassens høydeforandringer kan sammenlignes og bekreftes mot målinger av kontaktledningshøyden vist i kapittel 4.2. Høydebevegelsen til toppstykket lar seg dessverre ikke så lett verifisere da måleutstyret på målevognen er slik plassert at den ikke inkluderer denne bevegelsen.

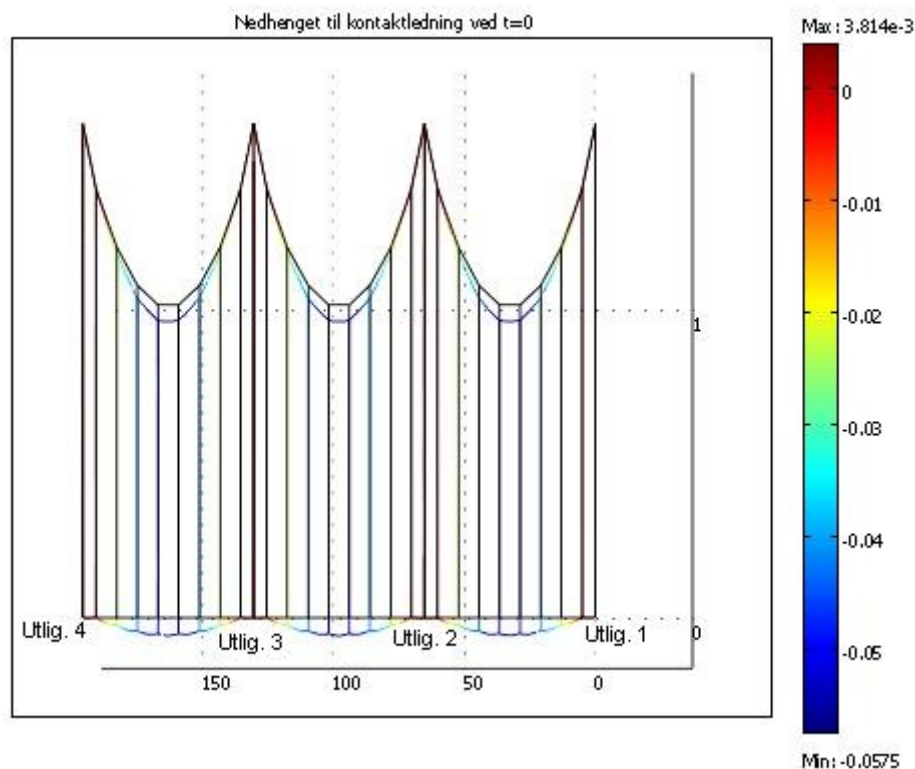
5.5 Simulering av kontaktledningen i Comsol

Avslutningsvis studeres oppførselen til kontaktledningen. Det gjøres først en simulering ved stasjonær tilstand ($t=0$) og deretter ved tidsvariant tilstand ($t>0$). Simuleringene tar for seg passering av en og to strømvatagere. Avstanden mellom to strømvatagere er 65 meter. Simuleringene sammenligner strømvatager med 100, 130 og 160 km/h. Andre viktige konstanter som er benyttet i simuleringssprogrammet finnes i appendiks H.

Totalt sett vil simuleringene bli mest reelle i spenn to og tre siden kontaktledningen i spenn en ikke vil være satt i bevegelse på grunn av de initialbetingelsene som er implementert. For å kunne studere bevegelsen til blant annet to strømvatagere er det valgt å foreta simuleringer over tre spenn. Ideelt sett skulle det vært modellert flere spenn for å kunne studere systemets svingninger før og etter passering av strømvatageren. En simulering av en modell med mange spenn vil være veldig tidkrevende å løse på grunn av alle de operasjonene som skal gjøres. I tillegg vil det gå på bekostning av minnekapasiteten.

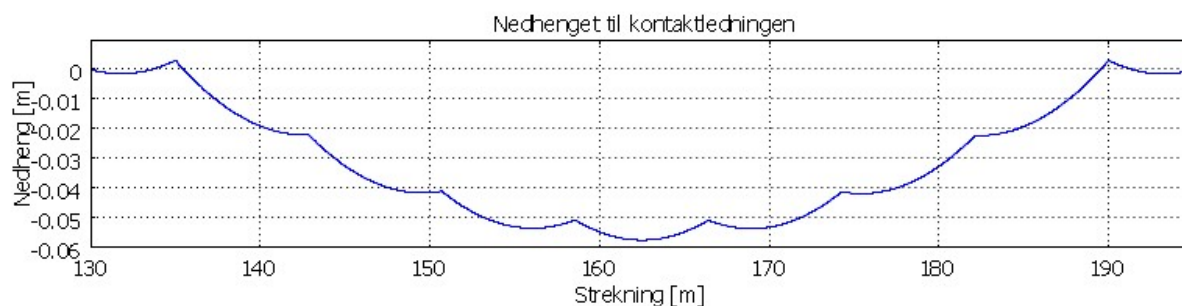
5.5.1 Statisk simulering

Det blir gjort en statisk simulering for å påvise at kontaktledningssystemet er riktig dimensjonert og parameterisert før strømvtageren samvirker med kontaktledningen. Kontaktledningen skal opprinnelig ha et nedheng som tilsvarer 6,5 cm ved $t=0$ når den ikke påvirkes av strømvtageren.



Figur 5-5 Kontaktledning med nedheng ved $t=0$

Figur 5-5 viser modellen med tre spenn som det vil bli foretatt simuleringer på. Dette er modellen sett i fra xz-planet. Til høyre i figuren er det en skala som viser nedhenget målt i forhold til kontaktledningens 0-nivå. Hvert spenn har maksimalt et nedheng på 5,75 cm, og oppløftet ved utligger er ca. 3,8 mm.



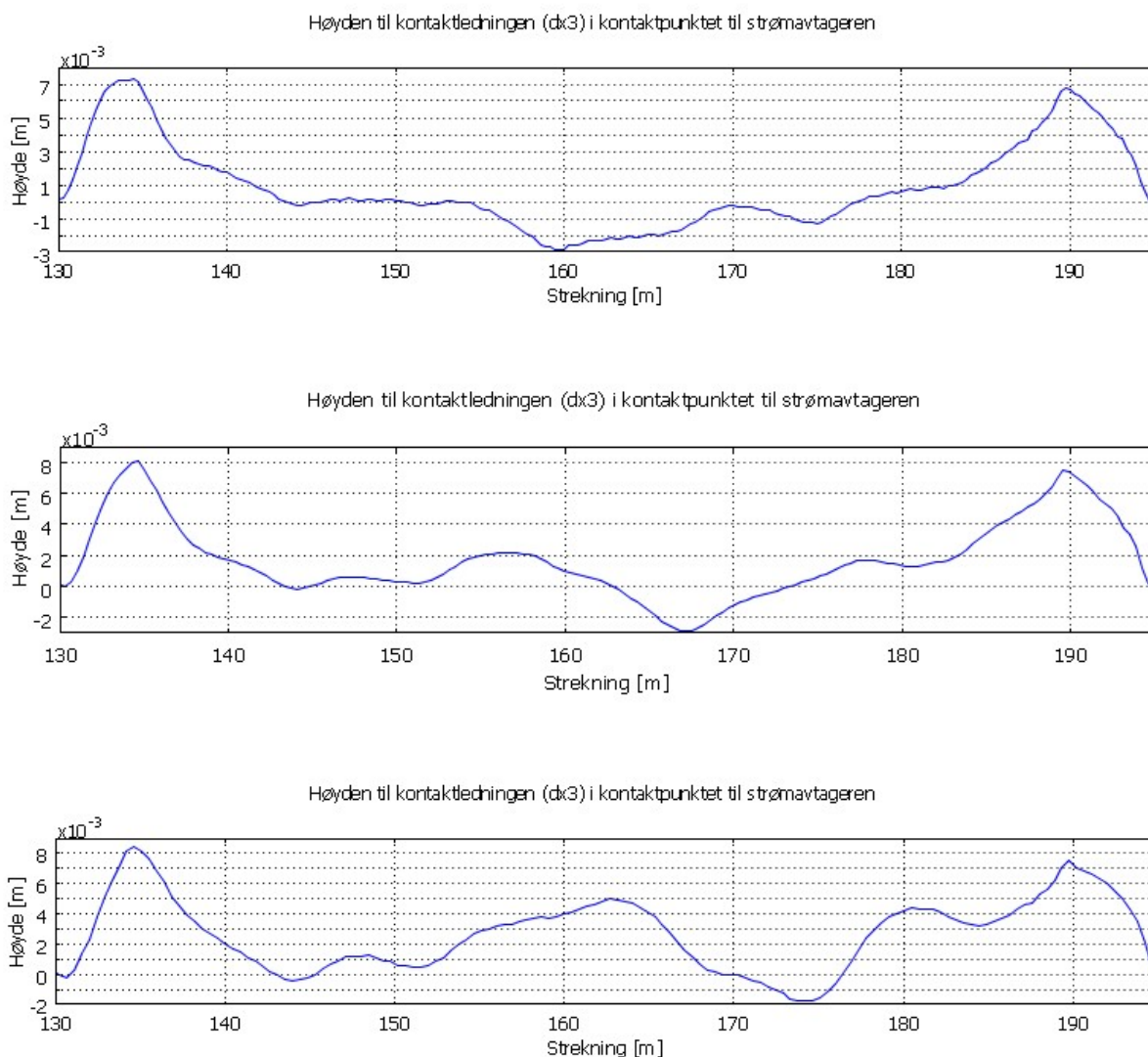
Figur 5-6 Kontaktledning med nedheng i et spenn (0-65 meter)

Feil! Fant ikke referansekilden. viser nedhenget i detalj for det første spennet. Det fremkommer av figuren at det mellom utligger og nærmeste hengertråd er et veldig begrenset nedheng. Dette stemmer med slik det virkelige systemet er bygd opp.

Dette nedhenget tilfredsstiller kravene som er stilt i teknisk regelverk til System 20 B beskrevet i kapittel 2.1.2, om at nedhenget bør være på mellom 3,25 og 6,5 cm. For å kunne evaluere oppløftet på utliggerne og oppløftet mellom utliggerne og nærmeste hengertråd, studeres elastisiteten til systemet. Denne analysen er gjort i kapittel 5.7.1.

5.5.2 Tidsvariant simulering med matematisk modell av strømvapteren

Videre foretas det en tidsvariant simulering for å påvise at kontaktledningen har riktig oppførsel når strømvapteren i fart til en hver tid samvirker med kontaktledningen. Simuleringen med en strømvapter er gjort i spenn 3 ved toghastighetene 100, 130 og 160 km/h.

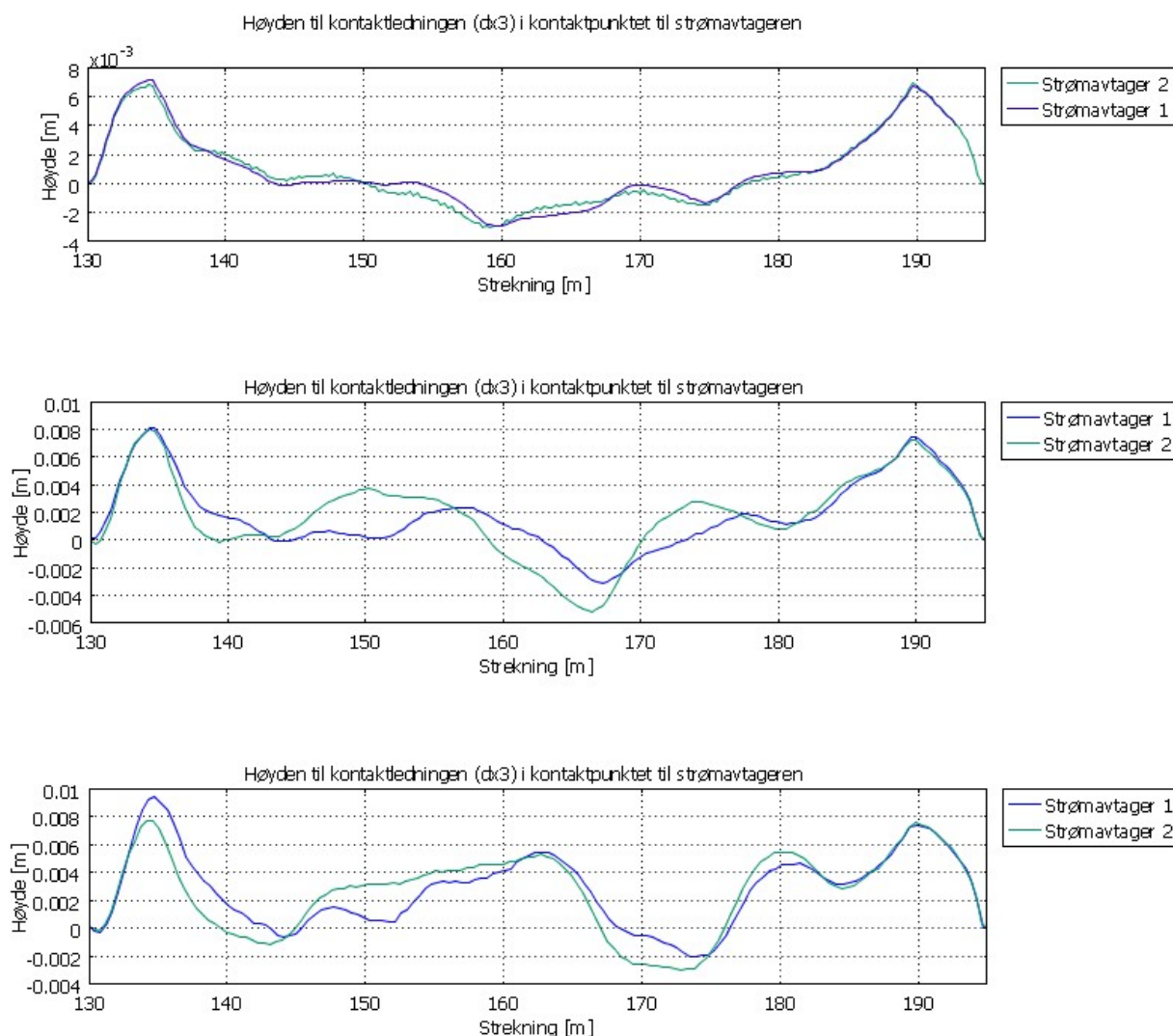


Figur 5-7 Kontaktledningens bevegelse ved en strømvapters passering til hver en tid (henholdsvis 100, 130 og 160 km/h)

Figurene viser at oppløftet på kontaktledningen, forårsaket av en strømvapter, blir større ettersom hastigheten øker. Fra å ligge ca. 3 mm under kontaktledningens nullpunkt ved 100 km/h midt i spennet, øker oppløftet til ca. 5 mm over kontaktledningens nullpunkt ved 160 km/h.

Disse simuleringene kan sammenlignes med målinger gjort av kontaktledningshøyden i kapittel 3.4. På bakgrunn av disse målingene observeres det at oppløftet på utligger er mye større enn det simuleringene ovenfor viser. Antagelse om hvorfor det er slik er beskrevet i kapittel 5.7.1.

Tilsvarende simuleringer ble gjort for to strømvaptere med 65 meters avstand i det tredje spennet. Disse resultatene er presentert Figur 5-8.

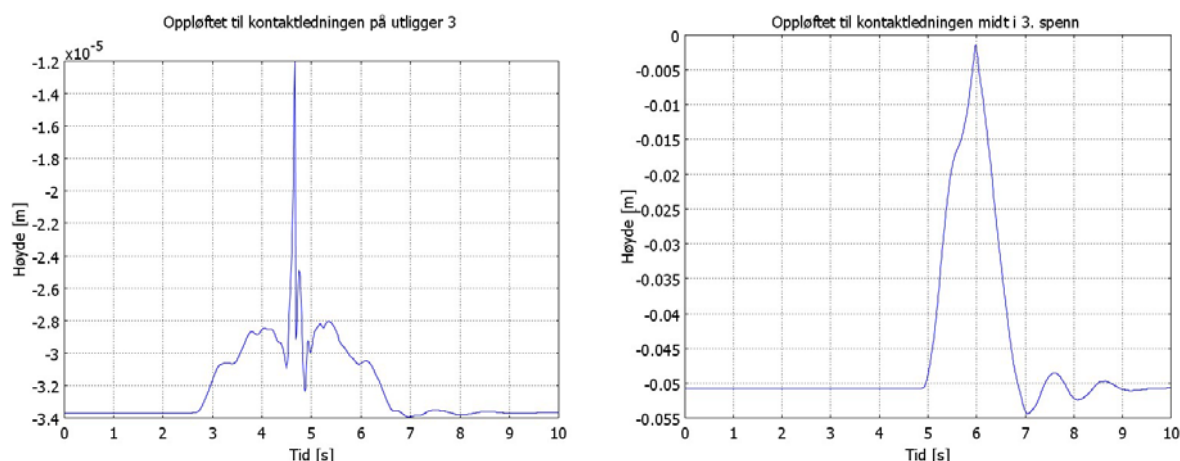


Figur 5-8 Kontaktledningens bevegelse ved to strømvogteres passering til hver en tid (100, 130 og 160 km/h)

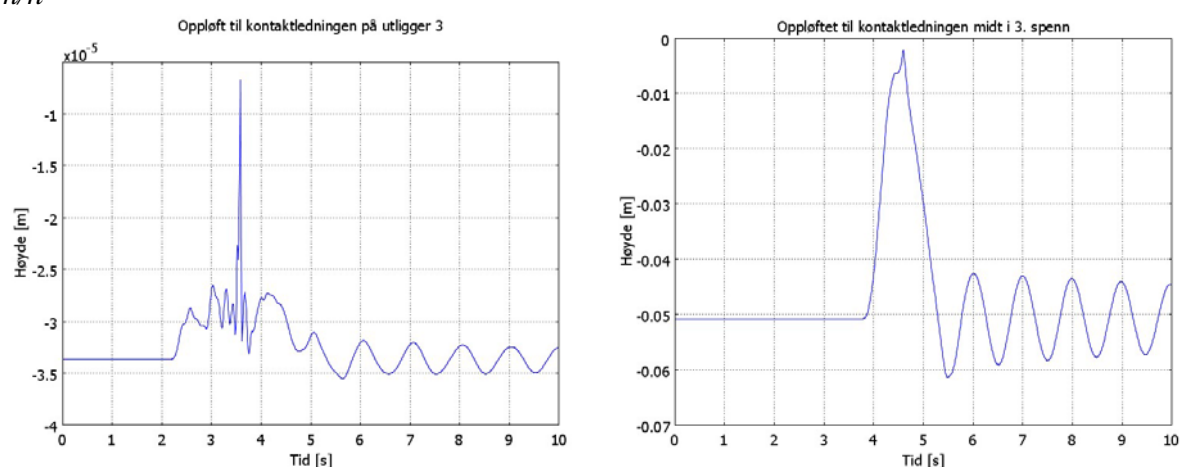
Figur 5-8 viser strømvogter 1 sin effekt på strømvogter 2 i spenn 3. Både strømvogter 1 og 2 får større og større andel av oppløftet over nullnivå samt at variasjonene mellom positivt og negativt oppløft er større.

Oppløftet til kontaktledningen i et gitt punkt (øyeblikkssimulering)

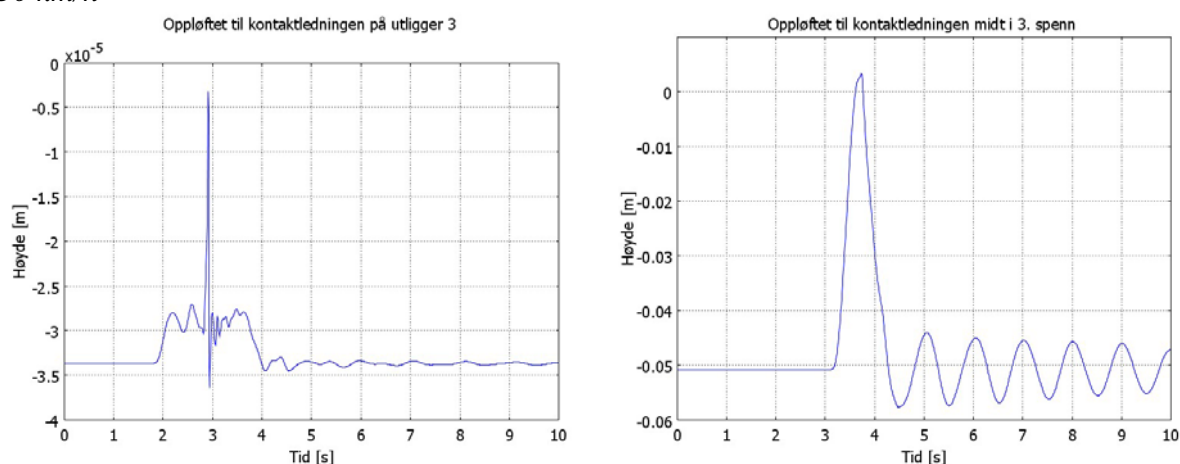
Øyeblikkssimuleringen viser strømvogteren når den passerer et gitt punkt på kontaktledningen. Det er valgt å simulere oppløftet på utligger nr.3 og en av de midtre hengertrådene (punkt 74) i spenn 3. Simuleringene er gjort for tidsrommet 0-10 sekunder for hastighetene 100, 130 og 160 km/h.



Figur 5-9 Oppløftet til kontaktledningen på utligger og midt i spenn 3 med en strømvatager i 100 km/h



Figur 5-10 Oppløftet til kontaktledningen på utligger og midt i spenn 3 med en strømvatager i 130 km/h



Figur 5-11 Oppløftet til kontaktledningen på utligger og midt i spennet med en strømvatager i 160 km/h

Simuleringene på utligger i Figur 5-9 og Figur 5-10 viser at kontaktledningen får en brå puls, men ikke beveger seg så mye opp sammenlignet med øyeblikksmålingene gjort på henholdsvis Seut og Vestfoldbanen i kapittel 3.2.

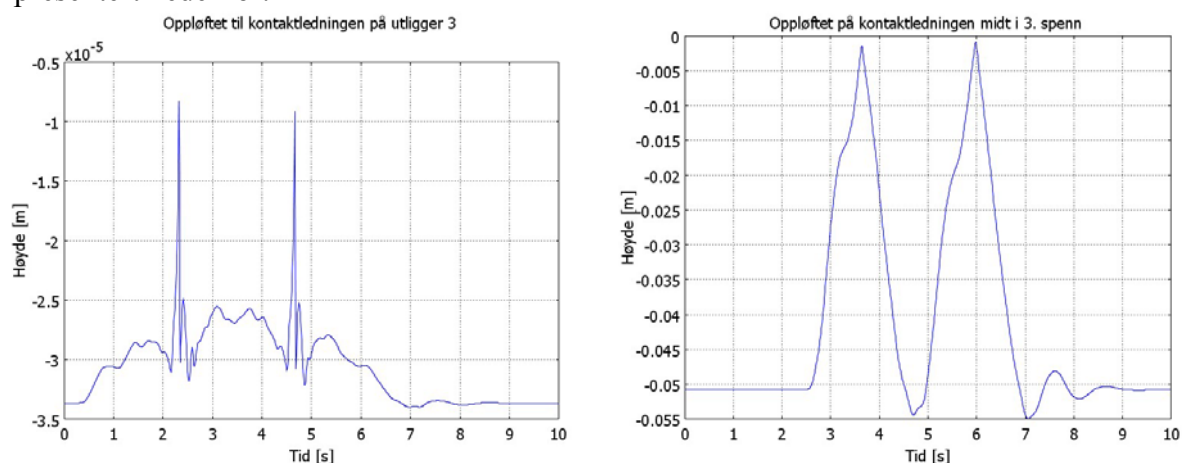
I målingene ble det avlest et oppløft på ca. 2,6 cm på utligger. Simuleringene viste imidlertid et oppløft på bare noen millimeter. Dette kan tyde på at utliggeren er ganske stiv eller tung. Nærmere forklaring følger i kapittel 5.7.

Simuleringene midt i spennet viser tydelig at kontaktledningen får et brått oppløft fra -0,05 til 0 meter i det strømvogteren passerer. Deretter avtar kurven noe slakere med påfølgende ettersvingninger. Frekvensen på disse ettersvingningene øker etter som hastigheten blir større. Ved 160 km/h registreres det at oppløftet er over null.

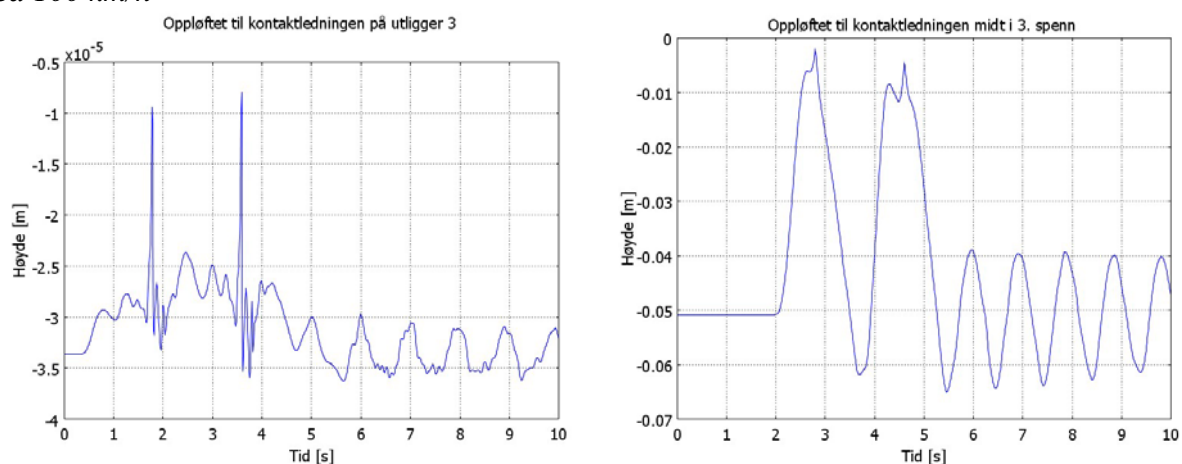
Hovedobservasjonen på simuleringene gjort midt i spennet er at det ikke var noen vibrasjon på kontaktledningen i forkant av oppløftet slik det var for målingene. Disse svingningene kom ikke til syne verken ved oppløftet på utligger eller oppløftet midt i spennet. Grunnen til dette antas å være at simuleringen bare ble gjort over tre spenn. Hadde simuleringen derimot blitt gjort over for eksempel ti spenn ville systemet fått tid til å svinge seg inn.

I tillegg er målingen gjort over en tidsperiode på 60 sekunder, mens simuleringen er på 10 sekunder. Figur 5-11 kan sammenlignes med simuleringer gjort i programmet BARTRAD beskrevet i [Reijm,06]. Disse figurene finnes i appendiks D.

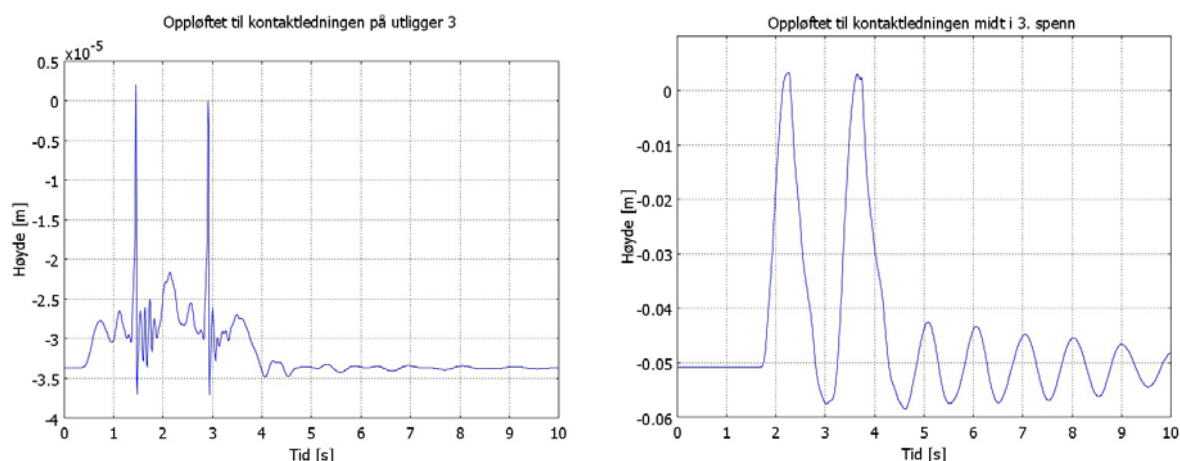
Tilsvarende simuleringer ble gjort for to strømvogtere med 65 meters avstand. Disse resultatene er presentert nedenfor.



Figur 5-12 Oppløftet til kontaktledningen på utligger og midt i spennet med to strømvogtere ved 100 km/h



Figur 5-13 Oppløftet til kontaktledningen på utligger og midt i spennet med to strømvogtere ved 130 km/h



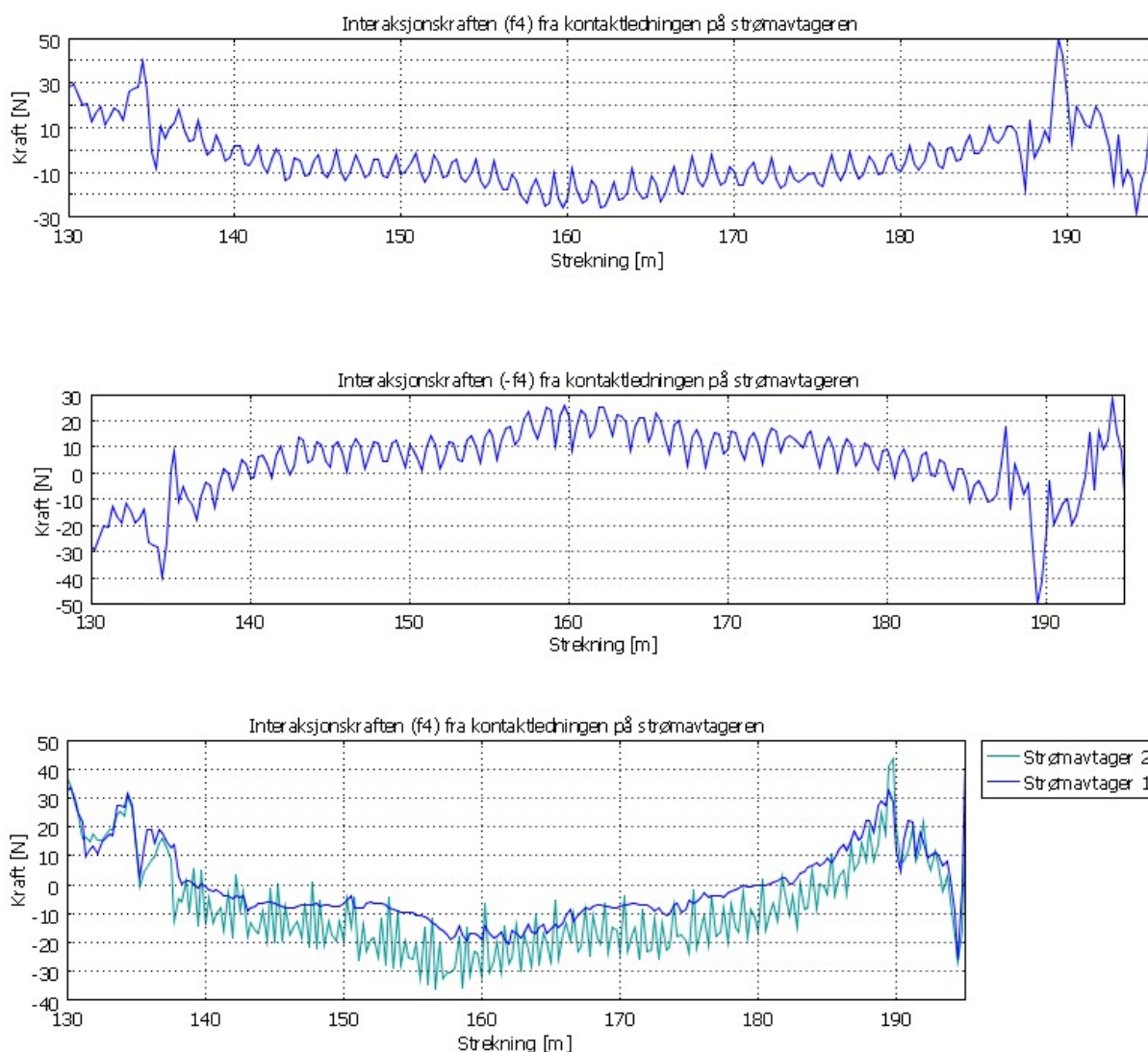
Figur 5-14 Oppløftet til kontaktledningen på utligger og midt i spennet med to strømvtagere ved 160 km/h

Med to strømvtagere viser det seg at det totale oppløftet til strømvtagers 2 blir større enn for strømvtagers 1. I tillegg viser figuren for 160 km/h at oppløftet både på utligger og midt i spennet vil bevege seg over nullpunktet.

Simulering av oppløftet midt i spennet i Figur 5-12 og Figur 5-13 ble sammenlignet med øyeblikksmålingene gjort på Seut og Vestfoldbanen i kapittel 3.2. Det ble observert at avstanden mellom strømvtagers er større på målingene enn i disse simuleringene. Tidsintervallet i målingen er antatt å være ca. 5 sekunder ved 100 km/h, mens tidsintervallet i simuleringen var på 2,3 sekunder ved 100 km/h. I målingen tilsvarte dette en strømvtagersavstand på ca. 139 meter. Videre ble det observert store krefter mellom strømvtagers på utliggerne. Dette henger sammen med at oppløftet på utliggeren er mindre enn det oppløftet skulle vært.

Interaksjonskraften til strømvtagers

I kontaktpunktet mellom strømvtagers og kontaktledningen eksisterer det to motsatt rettede krefter $+f_4$ og $-f_4$. Sett fra strømvtagers er retningen på f_4 definert oppover og sett fra kontaktledningen er retningen på f_4 definert nedover. Beskrivelsen av f_4 i figur 3-13 gir retningene på kreftene sett fra strømvtagers. Kraften f_4 som virker oppover viser den kraften som demper strømvtagers og den motsatt rettede kraften $-f_4$ har retning nedover og viser den kraften som strømvtagers dytter kontaktledningen opp med.

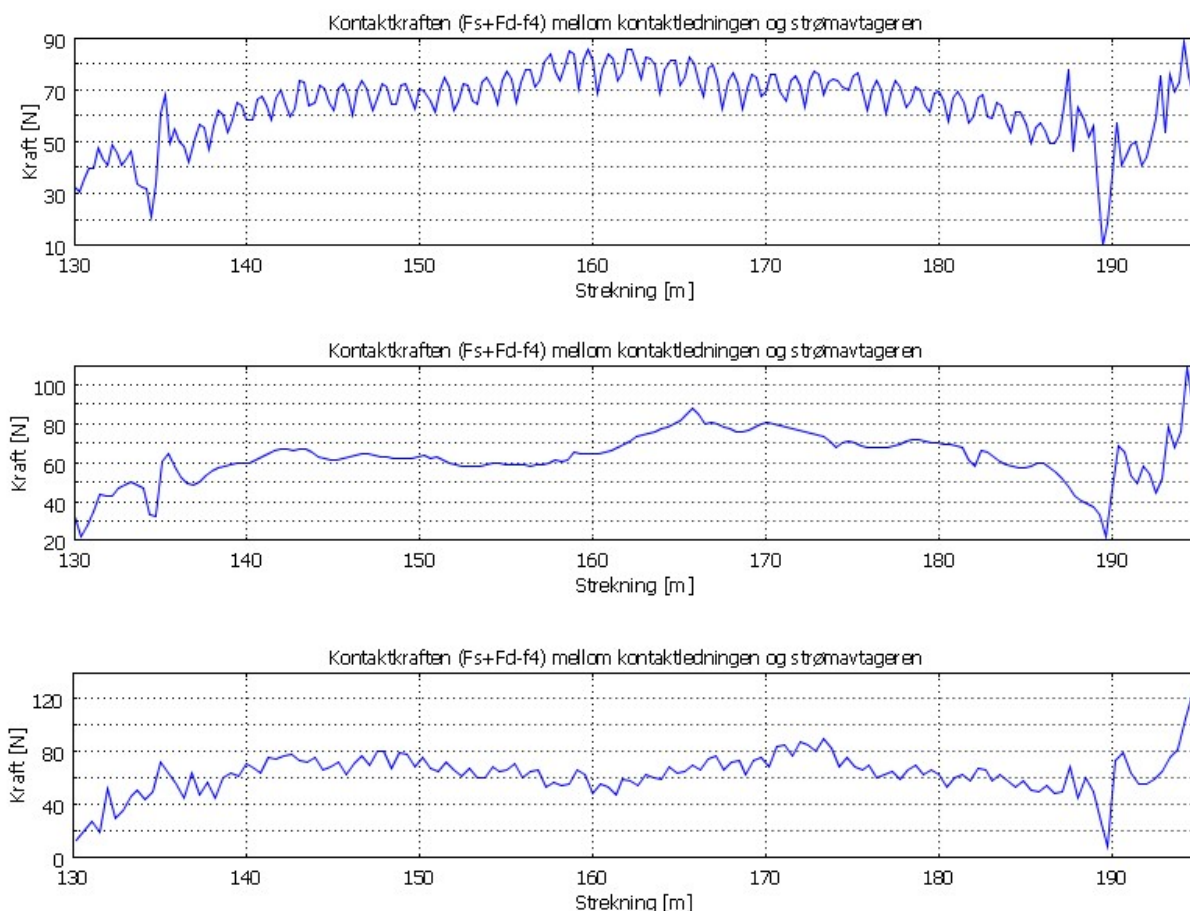


Figur 5-15 Interaksjonskraften (f_4 og $-f_4$) fra kontaktledningen med en og to strømvtagere ved 100 km/h

Figurene viser interaksjonskreftene sett fra toppstykket på strømvtageren og fra kontaktledningen.

Den totale kontaktkraften på kontaktledningen

Figurene nedenfor viser de totale kreftene generert mellom strømvtageren og kontaktledningen med en strømvtager ved hastighetene 100, 130 og 160 km/h. Den totale kontaktkraften (F_{tot}) består av interaksjonskraften (f_4), den statiske kraften (F_s) og den aerodynamiske kraften (F_d). Denne virker i positiv retning opp på kontaktledningen.

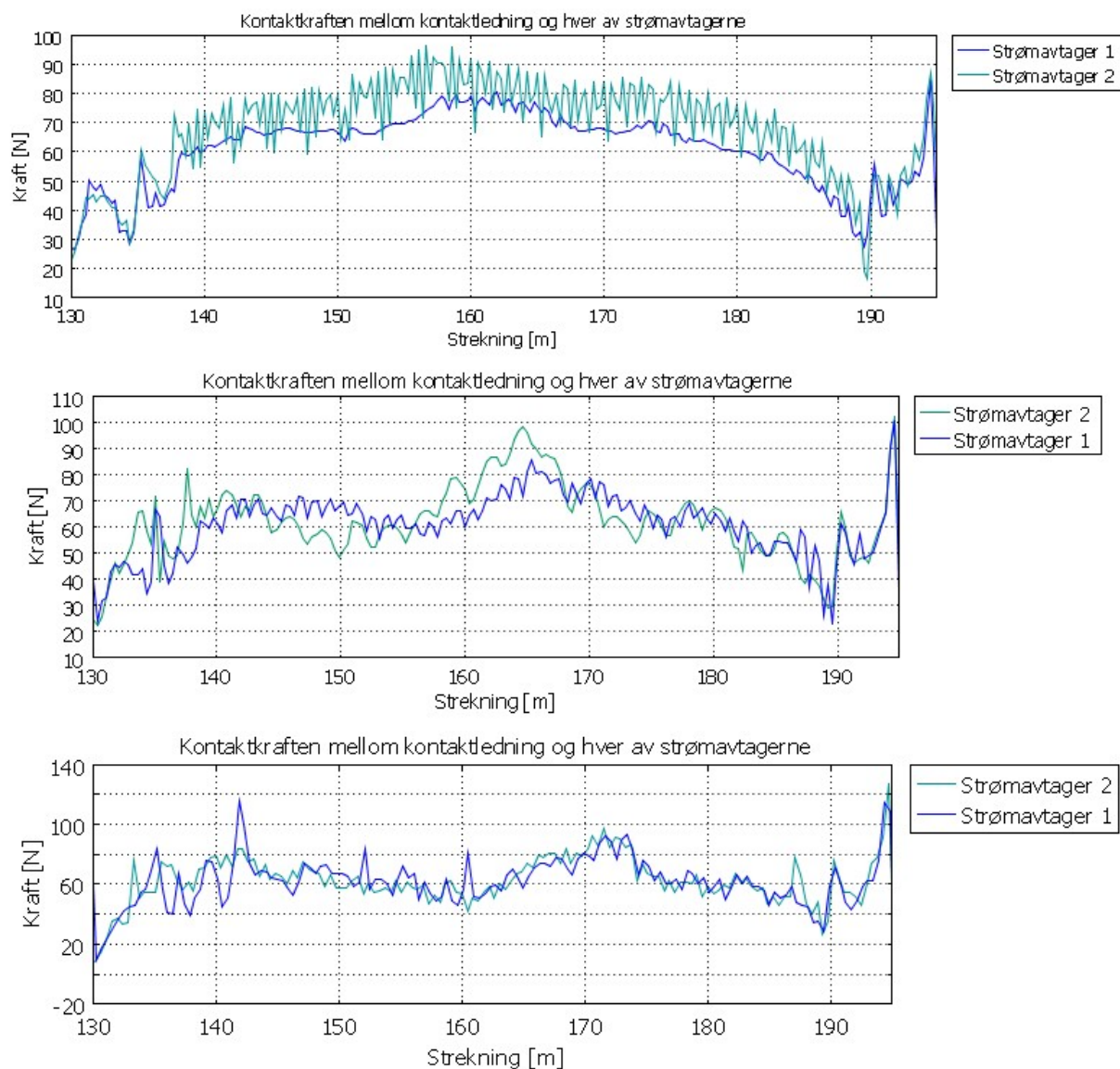


Figur 5-16 De totale kontaktkreftene ($F_s + F_d - f_4$) mellom kontaktledningen og en strømvogter
 Øverste: 100 km/h Midterste: 130 km/h Nederste: 160 km/h

Simuleringene viser at kreftene ligger mellom 20 og 100 N og at de varierer mer etter som hastigheten øker. I tillegg observeres det at det oppstår store krefter i nærheten av utliggerne. Disse simuleringene kan sammenlignes med de målte kreftene foretatt på strekningen Sarpsborg – Kornsjø presentert i kapittel 3.3.

Tilsvarende simuleringer ble gjort for to strømvogtere med 65 meters avstand, men i det tredje spennet. Disse resultatene er presentert nedenfor.

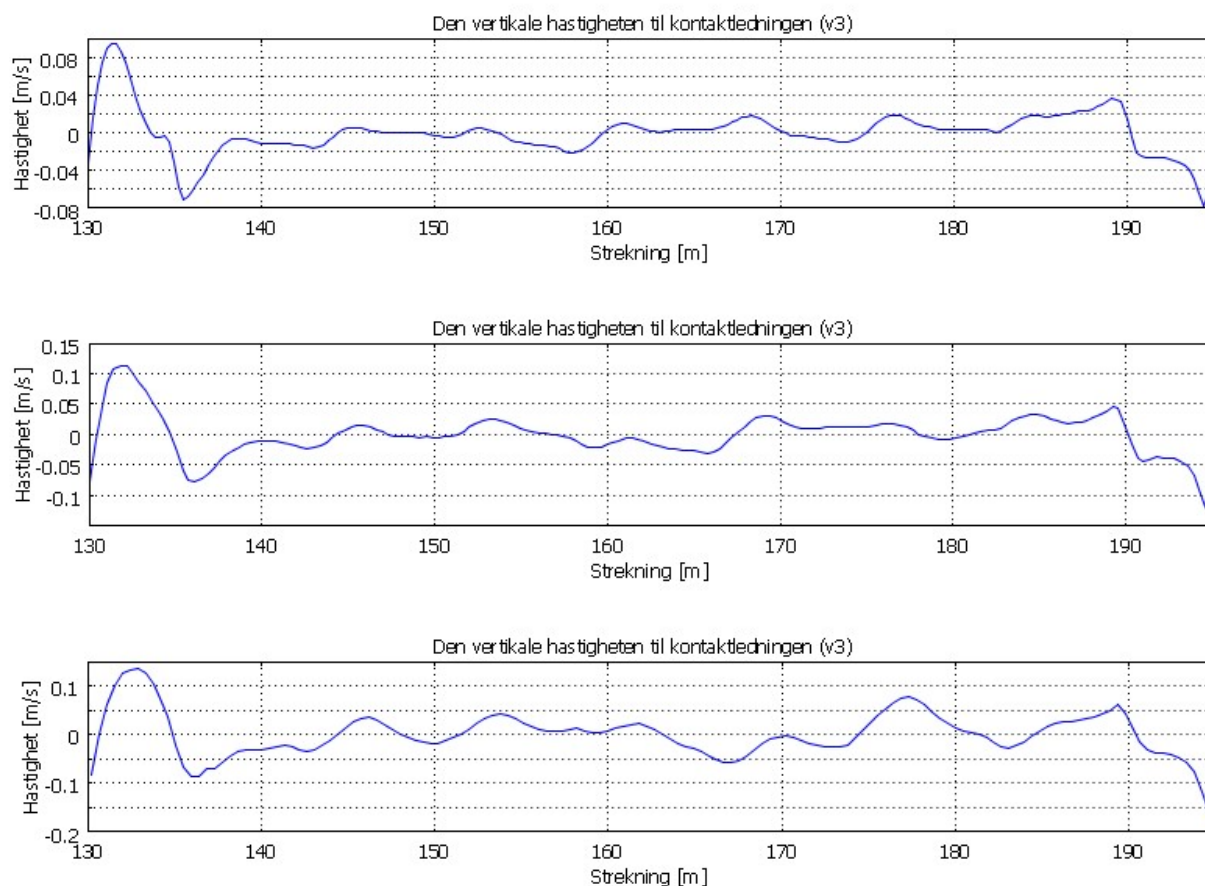
Disse simuleringene viser at de totale kreftene på strømvogter 2 er noe større enn de totale kreftene på strømvogter 1. Ved 100 km/h viser det seg at strømvogter 2 har størst variasjon i kontaktkreftene, mens dette ser ut til å være likt for strømvogter 1 og 2 ved 130 og 160 km/h. Effekten av fraslager ser også ut til å være størst midt i spennet fordi variasjonen her ser ut til å variere fra 60 til 80 N på kort tid.



Figur 5-17 De totale kontaktkreftene ($F_s + F_d - f_4$) mellom kontaktledningen og to strømvogtere
 Øverste: 100 km/h Midterste: 130 km/h Nederste: 160 km/h

Den vertikale hastigheten til kontaktledningen

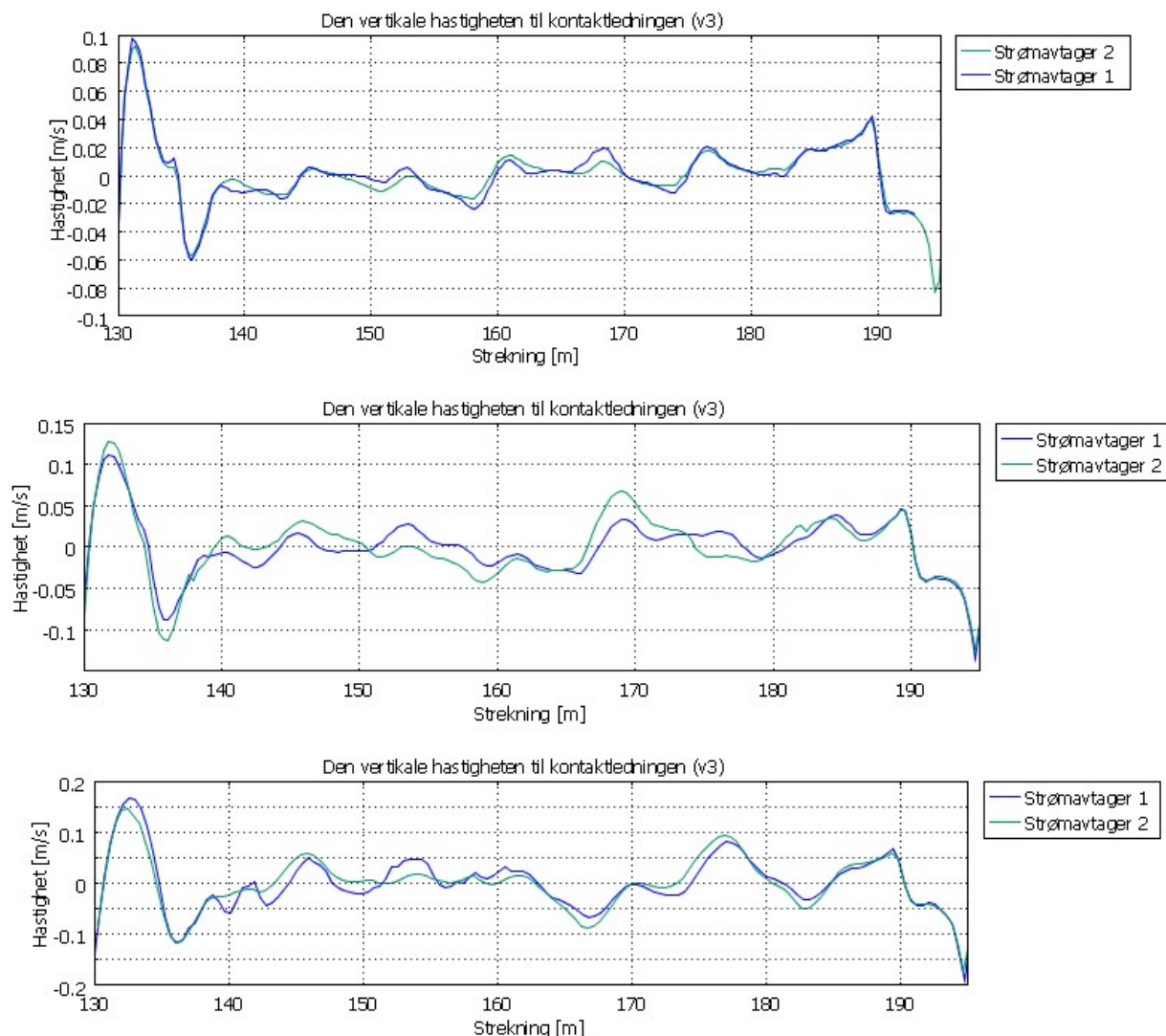
Figurene nedenfor viser den vertikale hastigheten til kontaktledningen (som er den samme hastigheten som toppstykket til strømvogteren har). Den vertikale hastigheten er både negativ og positiv avhengig av om kontaktledningen beveger seg ned eller opp.



Figur 5-18 Den vertikale hastigheten til kontaktledningen med en strømvavtaker i henholdsvis
 Øverste: 100 km/h Midterste: 130 km/h Nederste: 160 km/h

Figur 5-18 viser at den absolutte verdien til den vertikale hastigheten til kontaktledningen varierer fra 80 mm/s til ca. 150 mm/s avhengig av om hastigheten til strømvavtakeren er 100, 130 eller 160 km/h. Det er også tydelig at hastigheten er minst midt i spennet.

Denne simuleringen kan sammenlignes med måling av den vertikale hastigheten foretatt på strekningen Sarpsborg – Kornsjø presentert i kapittel 3.3.

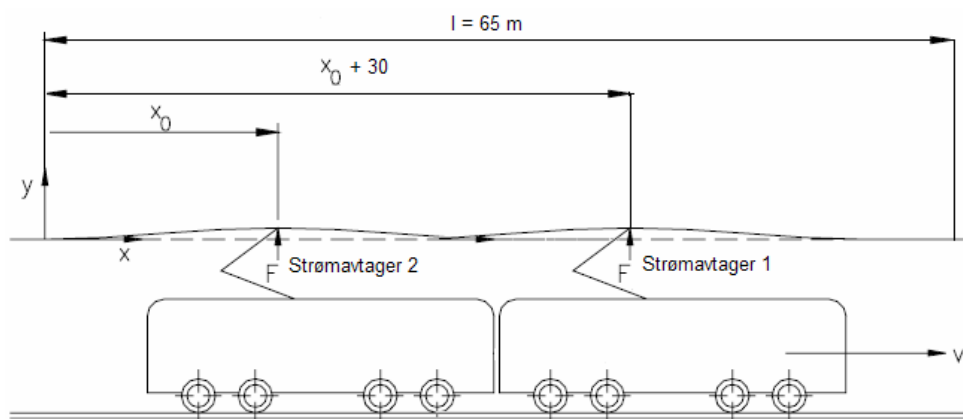


Figur 5-19 Den vertikale hastigheten til kontaktledningen med to strømvtagere i henholdsvis
 Øverste: 100 km/h Midterste: 130 km/h Nederste: 160 km/h

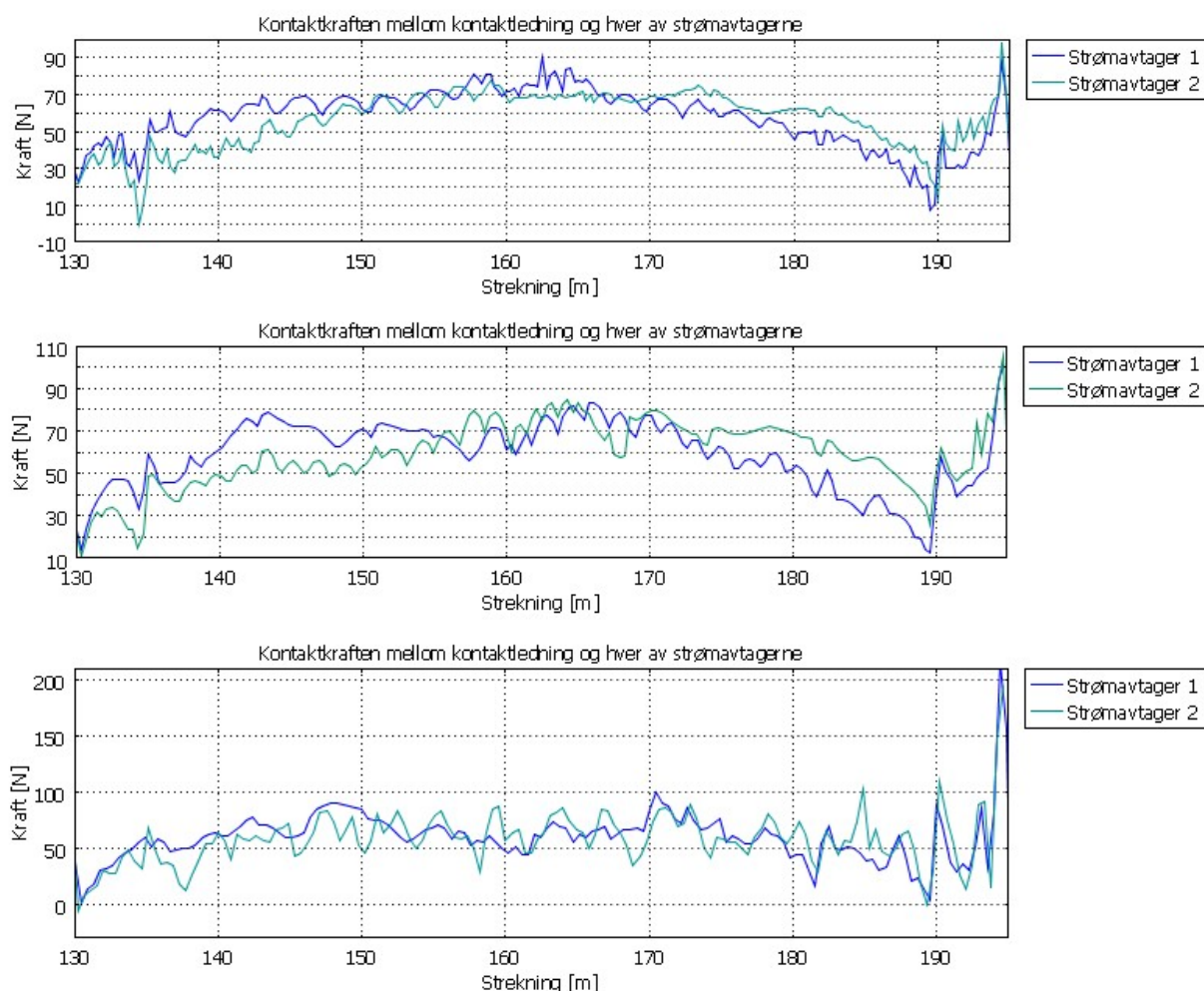
Denne simuleringen viser at profilen på hastighetsfiguren likner på den målte hastigheten til kontaktledningen. Hastighetsverdiene ser også ut til å stemme.

5.6 Betydningen av avstanden mellom to strømvtagere

For å studere effekten av ulike avstander mellom strømvtagerne er det gjort tre simuleringer hvor strømvtageravstanden er redusert ned til 30 meter. De totale kreftene mellom kontaktledningen og strømvtagerne beskriver denne effekten.



Figur 5-20 viser hvordan kontaktkreftene til strømvogter 1 påvirker kontaktkreftene til strømvogter 2 i det tredje spennet.



Figur 5-20 De totale kreftene ($F_s + F_d - f_4$) mellom kontaktledningen og to strømvogtere
 Øverste: 100 km/h Midterste: 130 km/h Nederste: 160 km/h

Figurene viste at kontaktkreftene til strømvogter 1 og 2 varierte mer og mer ettersom hastigheten økte fra 100 til 160 km/h. De største variasjonene ble observert på strømvogter 2. Ved 130 og 160 km/h ble disse variasjonene store i løpet av kort tid (80–60 N ved 130 km/h og 30–90 N ved 160 km/h). Disse observasjonene kan verifiseres ved å beregne middelveiden og standardavviket for strømvogter 1 og 2 som beskrevet i 5.7.2.

5.7 Simuleringens nøyaktighet

Som nevnt i kapittel 2,4 stilles det krav til de målte kreftene som opptrer mellom strømvapter og kontakttråd. Dette gjelder maksimums- og minimumskrefter samt middelkraft og standardavvik. Analysen av simuleringresultatene har tatt utgangspunkt i disse kravene.

For å oppnå god kontaktkvalitet må oppløftet av kontaktledningen begrenses. Det er selve konstruksjonen som begrenser oppløftet ved utliggerne. Oppløftet av kontaktledningen er ved lav og middels hastighet, og det vil si ved hastigheter inntil ca 50 % av bølgeutbredelseshastigheten. Skal kjørekvaliteten opprettholdes når kjørehastigheten økes må også kontaktkraften økes. Derfor må elastisiteten være så liten som mulig for å begrense oppløftet. [Kiessling,Puschmann,Schmieder,01] og [Sture,93] viser til Figur 5-21 og likning 5.1 for å beregne elastisiteten til midten av spennet for ulike kontaktledningssystem.

$$e_{\max} = \frac{l}{k(H_F + H_T)} \quad i \text{ mm} / N \quad 5.1$$

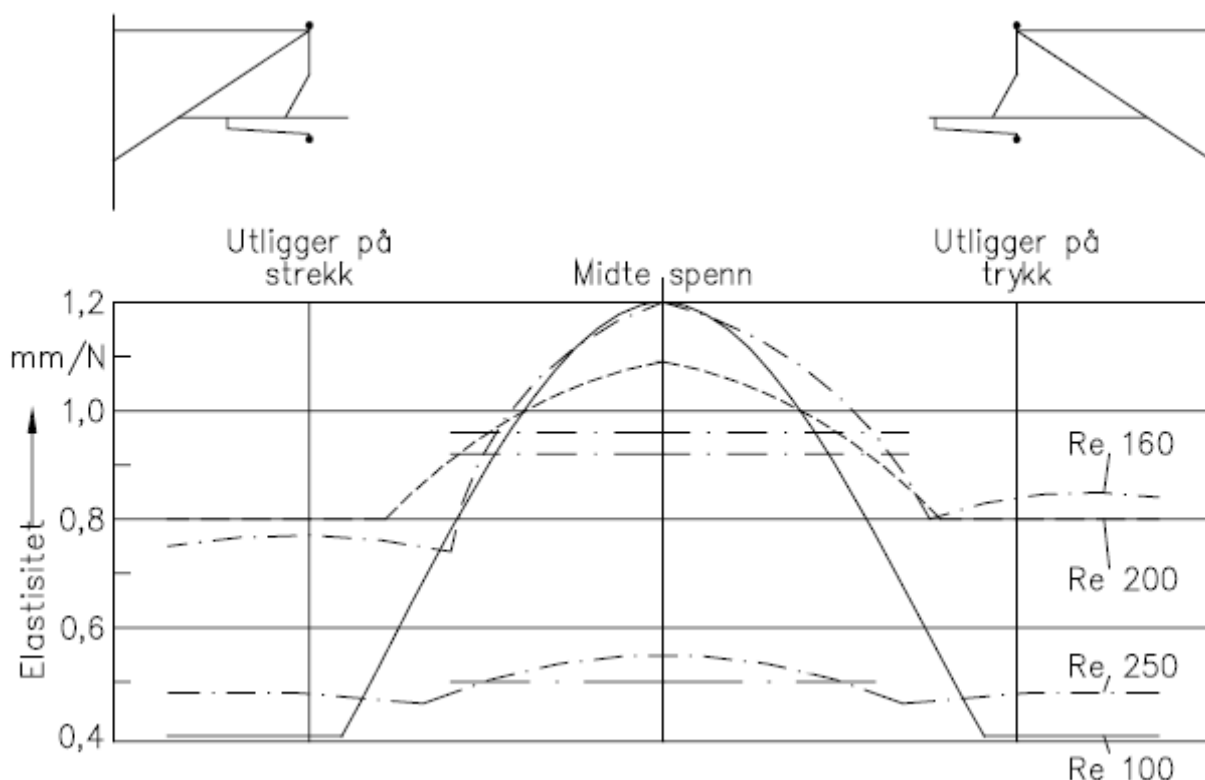
Hvor:

l = spennlengden til kontaktledningen

k = en faktor på 3.5 eller 4.0. Ledningsparter uten Y-line gir faktor på 4 og med Y-line 3.5

H_F = strekkraften i kontakttråden i kN

H_T = strekkraften i bærelinen i kN



Figur 5-21 Elastisiteten til en standard kontaktledning av type Re100, Re160, Re200 og Re250

System 20 B tilsvarer Re 160. Det største oppløftet oppstår på systemer uten Y-line.

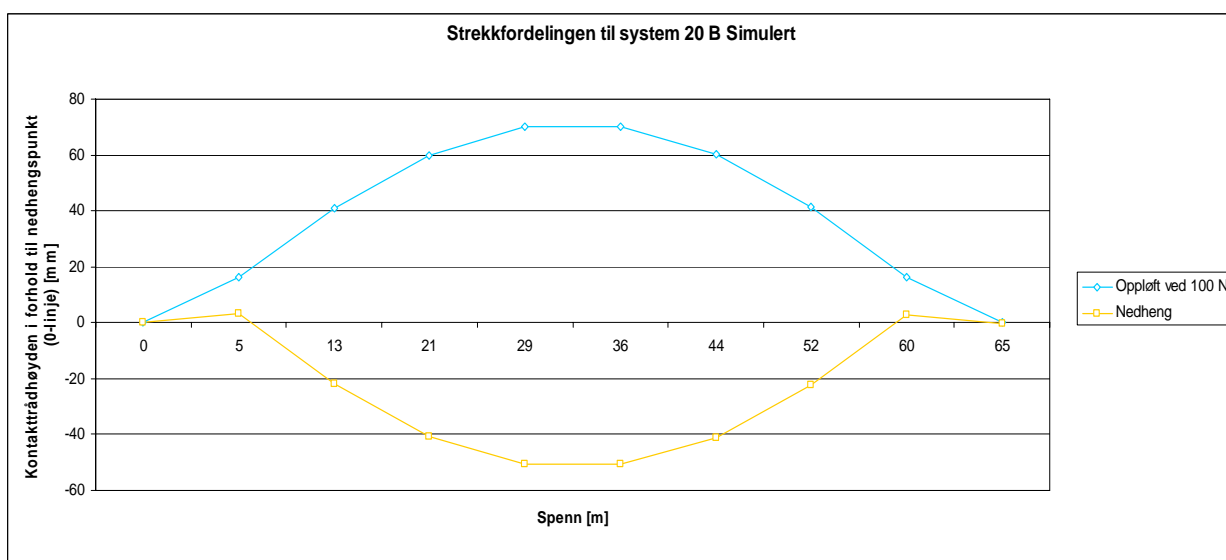
Maksimal elastisitet for system 20 B beregnes til følgende da det er et strekk i bæreline og kontaktledning på 10 kN og en spennlengde på 65 meter:

$$e_{\max} = \frac{65}{4 \cdot (10 + 10)} = \underline{\underline{0,8125}} \quad \text{i mm/N}$$

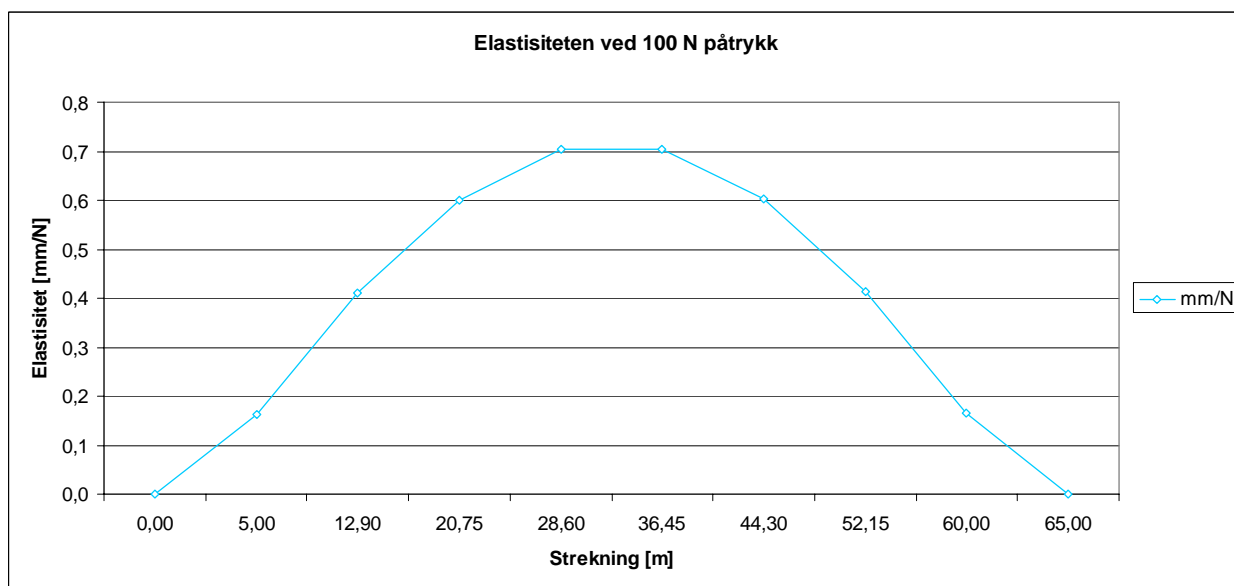
5.7.1 Elastisiteten til kontaktledningen

For å verifisere at elastisiteten til det statisk modellerte systemet, presentert i kapittel 5.5.1 tilsvarer de teoretiske verdiene, gjøres det en statisk simulering av kontaktledningen i spenn 2. Denne simuleringen består i å måle kontakttråd høyden ved hver utligger og hengetråd når 100 N blir påtrykt hvert enkelt målepunkt for seg. Når alle målingene er foretatt er det mulig å fremstille kurven for elastisitet grafisk med de forskjellige strekkene. Figur 5-22 viser nedhenget og oppløftet til hver hengetråd og utligger på kontaktledningen sett i forhold til 0-nivået til kontaktledningen.

Resultatet av denne beregningen er presentert i appendiks C. Den simulerte elastisitetskurven for system 20 B er vist i Figur 5-23.



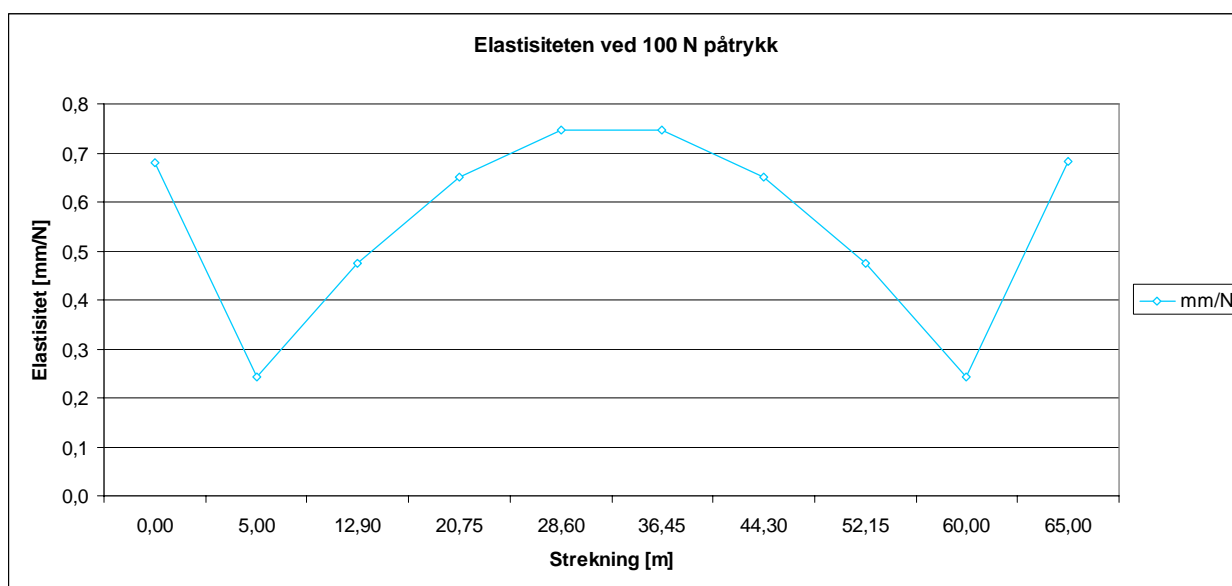
Figur 5-22 Strekkfordelingen til simulert kontaktledning i spenn 2



Figur 5-23 Elastisiteten til simulert kontaktledning i spenn 2

Figur 5-23 viser at beregnet maksimalverdi for elastisiteten, e_{\max} , til dette systemet nesten stemmer. En sammenligning av kurven til Re 160 i Figur 5-21 med Figur 5-23 viste at formen til elastisitetskurven stemmer for spennet mellom utliggerne. Derimot viste det seg at elastisiteten i systemet er veldig stiv på utliggerne. Figur 5-21 viste at elastisitetskurven starter på en positiv verdi over 0,4 på hver av utliggerne, mens den i Figur 5-23 begynte i 0.

Ved nærmere studier viste det seg at det lette direksjonsstaket ikke roterte fritt rundt sitt festepunkt på horisontalstaket. En fri rotasjon i x-retning på utliggeren og redusert tvang i y-retning på kontaktledningen resulterte i Figur 5-24. Denne viste at oppløftet på utliggeren var på nesten 6,5 cm. Oppløftet ellers i spennet øke ikke merkbart. Det ble dessverre ikke tid til å implementere disse endringene i modellene siden dette ble påvist rett før innlevering av oppgaven. Denne simuleringen ble gjort for et enkelt spenn. Dette forklarer hvorfor oppløftet blir litt større enn det opprinnelig burde være.



Figur 5-24 Elastisiteten til simulert kontaktledning i spenn 2

5.7.2 Middelkraften til kontaktledningen

Middelkraften for kontaktkreftene ble beregnet for å verifisere at kontaktkreftene er i henhold til krav i [Teknisk regelverk,04]. Det ble tatt utgangspunkt i kontaktkreftene med en strømvatager og to strømvatagere med 30 og 65 meters avstand. Disse er vist i henholdsvis Figur 5-16, Figur 5-17 og Figur 5-20. Det tas utgangspunkt i den simulerte kontaktkraften ($F_s + F_d - f_4$) når strømvatageren holder henholdsvis en konstant hastighet på 100, 130 og 160 km/h. Ved 100 km/h er kontaktkraften pr. 0,05 sekund registrert, for 130 km/h er det hvert 0,04 sekund og for 160 km/h er det hvert 0,03 sekund. Kontaktkreftene er registrert når strømvatageren befinner seg i spenn 3. Resultatet av denne datainnsamlingen er presentert i appendiks C og i Tabell 5-2, Tabell 5-3 og Tabell 5-4.

Tabell 5-2 er basert på kontaktkreftene til en strømvatager som vist i Figur 5-16.

Tabell 5-2 Krefter på strømvatageren når kun en strømvatager passerer

Parametere	Enhet	Simulerte verdier		
		1 strømvatager		
Hastighet, V	km/h	100	130	160
Antall verdier		47	46	48
Middel verdi, F_{mid}	N	64,9	61,17	61,6
Maks. verdi, F_{maks}	N	85,5	84,83	90,3
Min. verdi, F_{min}	N	33,9	27,36	20,99
Standardavvik, S	N	12,27	13,15	13,7
$F_{mid} - (3*S)$	N	21,45	21,71	20,49
$F_{mid} + (3*S)$	N	108,36	100,64	102,7
0-25 N	%	0	0	2,1
25-50 N	%	10,63	17,39	18,75
50-75 N	%	68,1	67,39	58,33
75-100 N	%	23,4	15,22	20,83

Middelverdien og standardavviket i Tabell 5-2 ble sammenlignet med de målte verdiene i Tabell 3-3 og Tabell 3-4 for hastighetene 100 og 130 km/h. Sammenligningen viste at middelverdien i simulert modell generelt var litt lavere enn de målte verdiene og at standardavviket i simulert modell var betydelig høyere enn de målte verdiene. Denne forskjellen synnlighjøres videre i grenseverdiens største og minste middelkraft.

Tabell 5-3 er basert på kontaktkreftene til strømvatager to når to strømvatager passerer med 65 meters mellomrom, som vist i Figur 5-17.

Tabell 5-3 Krefter for strømvatager 2 når det er 65 meter mellom strømvatagerne

Parametere	Enhet	Simulerte verdier		
		Strømvatager 2 (avstand 65 m)		
Hastighet, V	km/h	100	130	160
Antall verdier		47	46	48
Middelkraft, F_{mid}	N	67,66	60,67	62,66
Maks.verdi, F_{maks}	N	92,68	98,10	96,17
Min.verdi, F_{min}	N	31,93	24,32	23,01
Standardavvik, S	N	15,48	14,60	15,23
$F_{mid} - (3*S)$	N	21,23189	16,88438	16,97454
$F_{mid} + (3*S)$	N	114,0837	104,4637	108,341
0-25 N	%	0	2,173913	2,083333
25-50 N	%	14,89362	13,04348	12,5
50-75 N	%	65,95745	71,73913	64,58333
75-100 N	%	21,2766	13,04348	22,91667

Tabell 5-4 er basert på kontaktkreftene til strømvatager to når to strømvatagerne passerer med 30 meters mellomrom, som vist i Figur 5-20.

Tabell 5-4 Krefter for strømvatager 2 når det er 30 meter mellom strømvatagerne

Parametere	Enhet	Simulerte verdier		
		Strømvatager 2 (avstand 30 m)		
Hastighet, V	km/h	100	130	160
Antall verdier		47	46	48
Middelkraft, F_{mid}	N	56,98	58,14	57,25
Maks.verdi, F_{maks}	N	97,84	83,52	86,17
Min.verdi, F_{min}	N	7,50	14,98	11,82
Standardavvik, S	N	16,15	15,73	18,16
$F_{mid} - (3 \cdot S)$	N	8,517724	10,95395	2,783766
$F_{mid} + (3 \cdot S)$	N	105,4371	105,3286	111,7153
0-25 N	%	2,12766	4,347826	4,166667
25-50 N	%	25,53191	17,3913	31,25
50-75 N	%	46,80851	63,04348	45,83333
75-100 N	%	17,02128	15,21739	18,75

Middelkraften og standardavviket i Tabell 5-2, Tabell 5-3 og Tabell 5-4 evalueres opp mot kravene til middelkraft og standardavvik i Jernbaneverket. Disse er gitt i kapittel 2.4. Ut fra Figur 2-10, Figur 2-11 og Figur 2-12 leses følgende:

Hastigheter	100 km/h	130 km/h	160 km/h
JBV Middelverdi, F_{mid}	60-75 N	65-80 N	75-85 N
WBL 88 Middelverdi, F_{mid}	60 N	65 N	70 N
JBV Standardavvik, S	15 N	16 N	17 N
JBV Grenseverdier for middelkraft	23-120 N	26-128 N	30-138 N

Simuleringen av en strømvatager viste at middelkraften:

- ved 100 km/h ($F_{mid}=64,9$) er innenfor Jernbaneverkets krav til minimal og maksimal verdi på 60 og 75 N
- ved 130 km/h ($F_{mid}=61,17$) er ca. 4 N lavere enn Jernbaneverkets krav til minimal middelverdi på 65 N
- ved 160 km/h ($F_{mid}=61,6$) er 13,4 N lavere enn Jernbaneverkets krav til minimal middelverdi på 75 N

Simuleringen av strømvatager 2, 65 meter bak strømvatager 1 viste at middelkraften:

- ved 100 km/h ($F_{mid}=67,66$) er innenfor Jernbaneverkets krav til minimal og maksimal verdi på 60 og 75 N
- ved 130 km/h ($F_{mid}=60,67$) er ca. 4 N lavere enn Jernbaneverkets krav til minimal middelverdi på 65 N
- ved 160 km/h ($F_{mid}=62,66$) er ca. 12 N lavere enn Jernbaneverkets krav til minimal middelverdi på 75 N

Simuleringen av strømvatager 2, 30 meter bak strømvatager 1 viste at middelkraften:

- ved 100 km/h ($F_{mid}=56,98$) er ca. 3 N lavere enn Jernbaneverkets krav til minimal og maksimal verdi på 60 og 75 N
- ved 130 km/h ($F_{mid}=58,14$) er ca. 7 N lavere enn Jernbaneverkets krav til minimal middelverdi på 65 N
- ved 160 km/h ($F_{mid}=57,25$) er 18 N lavere enn Jernbaneverkets krav til minimal middelverdi på 75 N

Av disse resultatene fremkommer det at verdien på middelkreftene avtar fra JBV's krav ved:

- økende hastighet
- redusert avstand mellom strømvtagerne

Kurven som representerer WBL 88 sine beregnede middelveier i Figur 2-10, viser at middelkraften for hastigheter større enn 100 km/h ligger under Jernbaneverkets minstekrav.

Simuleringen av en strømvtagert viste at standardavviket:

- ved 100 km/h ($S=12,27$) er innenfor Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 15 N
- ved 130 km/h ($S=13,15$) er innenfor Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 16 N
- ved 160 km/h ($S=13,7$) er innenfor Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 17 N

Simuleringen av strømvtagert 2, 65 meter bak strømvtagert 1 viste at standardavviket:

- ved 100 km/h ($S=15,48$) overskrider Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 15 N
- ved 130 km/h ($S=14,6$) er innenfor Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 16 N
- ved 160 km/h ($S=15,23$) er innenfor Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 17 N

Simuleringen av strømvtagert 2, 30 meter bak strømvtagert 1 viste at standardavviket:

- ved 100 km/h ($S=16,15$) overskrider Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 15 N
- ved 130 km/h ($S=15,73$) er innenfor Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 16 N
- ved 160 km/h ($S=18,16$) overskrider Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 17 N

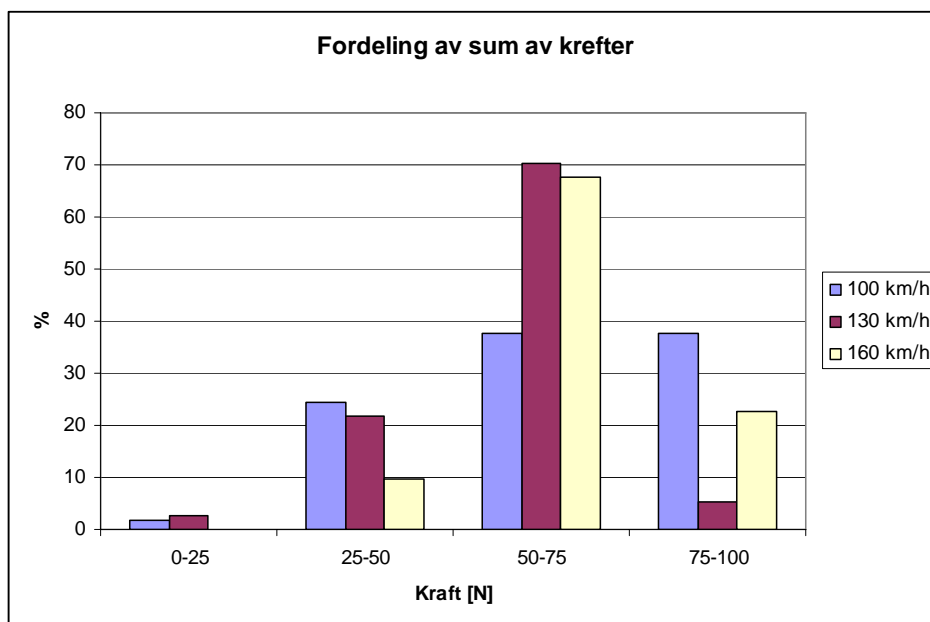
Simuleringen av to strømvtagere med 65 og 30 meters mellomrom viste at grenseverdiens minste middelkraft:

- $F_{\text{mid}} - (3 \cdot S)$ er lavere enn Jernbaneverkets krav ved passering av to strømvtagere med 65 og 30 meters mellomrom for hastighetene 100, 130 og 160 km/h
- $F_{\text{mid}} - (3 \cdot S)$ er under 10 N ved passering av to strømvtagere med 30 meters mellomrom

Simuleringen av to strømvtagere med 65 og 30 meters mellomrom viste at grenseverdiens største middelkraft:

- $F_{\text{mid}} + (3 \cdot S)$ er innenfor Jernbaneverkets krav for samtlige simuleringer

Figur 5-25 viser en grafisk fremstilling av fordeling av kreftene for de ulike hastighetene for en strømvtagert.



Figur 5-25 Fordeling av sum krefter ved passering av kun en strømvatager

5.7.3 Fraslag

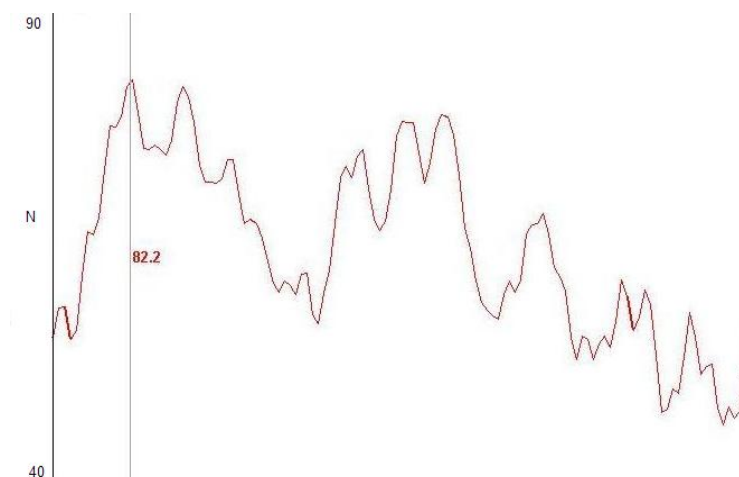
Effekten av at strømvatageren mister kontakten med kontaktledningen synliggjøres i de tilfeller der kontaktkraften er mindre enn 10 N. Modellen med en og to strømvatagere skal være ideell og skal ikke gi rom for fraslag.

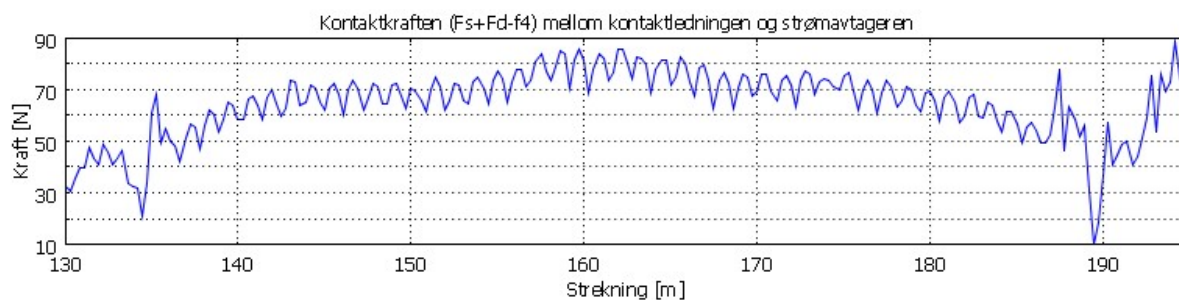
Simuleringen med to strømvatagere med 30 meter avstand viste at de minste kontaktkreftene er lavere enn 10 N ved 100 km/h. Dette gir rom for fraslag og er ikke ønskelig. Ved økende hastighet økte verdien på de minste kontaktkreftene.

5.8 Sammenligning av målinger og simuleringer

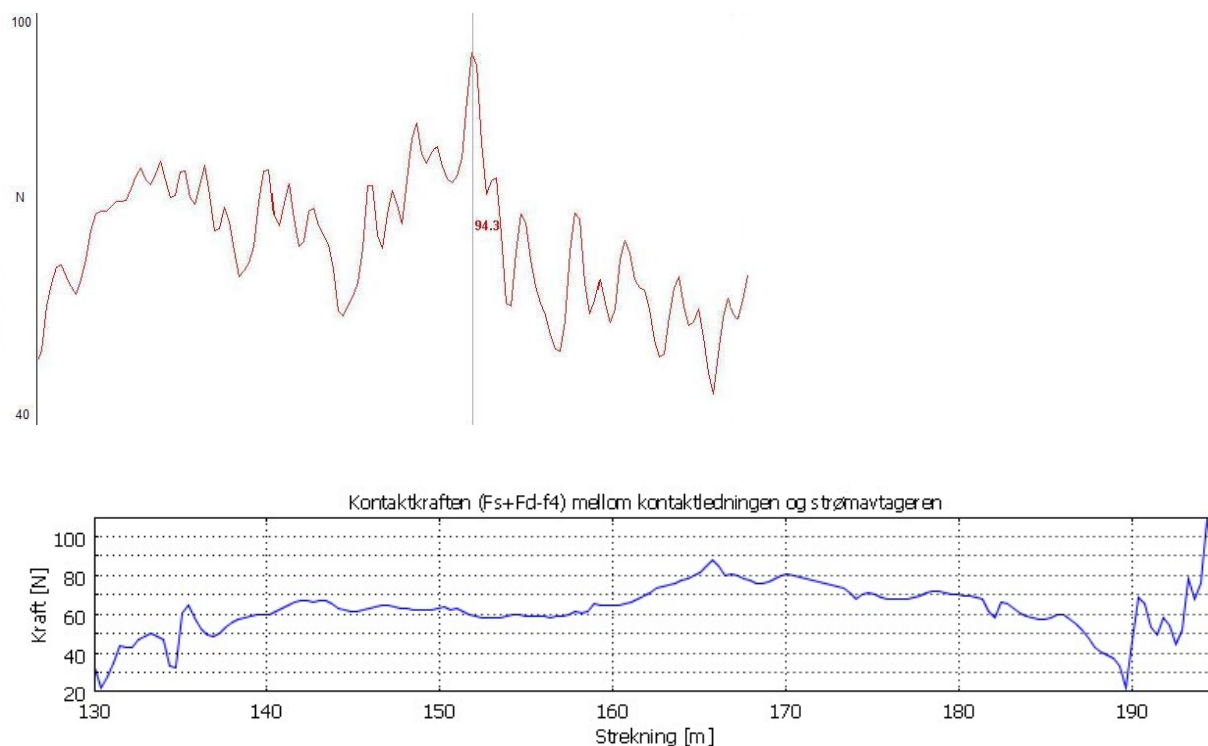
5.8.1 Med 1 strømvatager

Målingene som presenteres nedenfor viser de totale kreftene målt over to ulike spenn hvor hastighetene 100 og 130 km/h forekommer. En sammenligning av Figur 5-26 med simuleringene gjort av de totale kreftene for en strømvatager ved 100 km/h i Figur 5-16 viser at simuleringen avviker fra målefigurens profil. Derimot ser simuleringen ved 130 km/h mer ut til å ligne på tilsvarende målefigur.

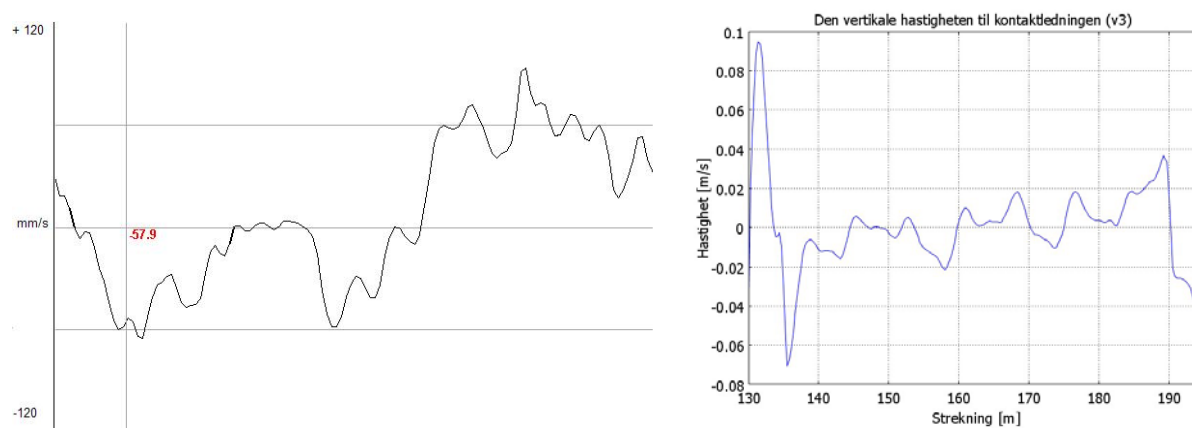




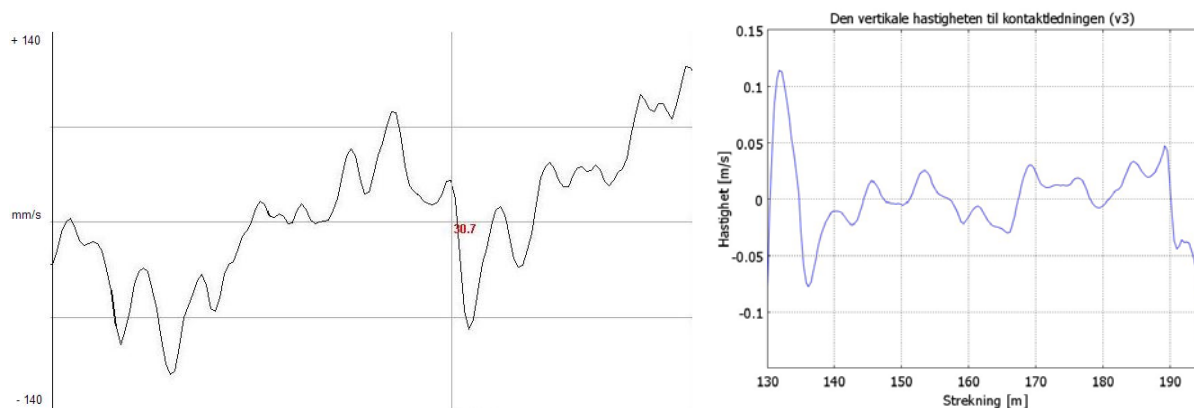
Figur 5-26 Sammenligning av målte og simulerte kontaktkrefter ved ca. 100 km/h



Figur 5-27 Sammenligning av målte og simulerte kontaktkrefter Ved ca. 130 km/h.



Figur 5-28 Sammenligning av målte og simulerte vertikale hastigheter ved ca. 100 km/h.



Figur 5-29 Sammenligning av målte og simulerte vertikale hastigheter ved ca. 130 km/h.

Profilene til den målte og simulerte figuren ligner. Ved nærmere studier viste det seg at den vertikale hastigheten i simuleringene er lavere enn de målte hastighetene.

5.9 Animasjon

I Comsol kan hele simuleringen settes sammen til en animasjonsfilm. Denne animeringen viser bevegelsen av en og to strømvtagere. Fremgangsmåte og kildekode for å gjøre denne animeringen er beskrevet i veiledningen i appendiks H. Animeringsfilen er en avi-fil og ligger på egen DVD i appendiks H.

5.10 Sammendrag

Det er i denne oppgaven valgt å benytte en ”kvasi” dynamisk modellering. Det vil si at strømvtageren er modellert ved hjelp av differensiallikninger, kontaktledningssystemet ved hjelp av FEM, mens den statiske og den aerodynamiske kraften er modellert ved hjelp av gitte parametere som er bevist gode nok. Dette har vist seg å være like godt som et fullstendig dynamisk modellert system. Et fullstendig dynamisk modellert system vil bli veldig komplekst da det er veldig mange parametere som det kan taes høyde for. En slik utregning vil være tidkrevende.

Innledningsvis ble det presentert simuleringer utført i Matlab. På denne måten ble det konstatert at modellen av strømvtageren var stabil. Strømvtageren svinger seg inn mot stasjonær tilstand ved en kortvarig ytre påvirkning. Denne modellen er derfor brukt videre i simuleringene gjort i Comsol.

Deretter ble det presentert simuleringer utført i Comsol. Disse viser interaksjonen med kontaktledningen med en og to strømvtagere for hastighetene 100, 130 og 160 km/h. Simuleringene viste oppløftet til kontaktledningen i kontaktpunktet mellom strømvtager og kontaktledning, øyeblikkssimuleringer på utligger og midt i spennet, de totale kreftene og den vertikale hastigheten. Disse simuleringene blir evaluert mot elastisitetsskurven og verdier for middelkraft og standardavvik. Disse simuleringene finnes på DVD i appendiks H.

Konklusjonen for simulering med en og to strømvtagere, og med to strømvtagere med ulik avstand er oppsummert i kapittel 6.

6 Konklusjoner

Rapporten presenterer resultatene fra analyse av kontaktkreftene gjort for kontaktledningssystem 20 B og strømavtager WBL 88. Målet med oppgaven har vært å modellere en realistisk modell av kontaktledningssystemet og strømavtageren. Arbeidet har vært delt i fire:

- Litteraturstudium og innhenting av opplysninger
- Modellering av strømavtager og kontaktledning i programmet Matlab og Comsol
- Simulering av systemet:
 1. System med en strømavtager
 2. System med to strømavtagere
- Sammenligning med gjennomførte målinger

I kapittel 5 presenteres simuleringer gjort for toghastigheter på 100, 130 og 160 km/h. Det er gjort simuleringer både med en og to strømavtagere. Avstanden mellom strømavtagerne er enten 30 og 65 meter. Godheten av disse simuleringene er vurdert ved hjelp av informasjon om krav til elastisitet og middelkraft. Videre er simuleringene sammenlignet med målinger som er presentert i kapittel 3.

6.1 Vurdering av strømavtagermodell WBL 88

Godheten til strømavtagermodellen ble vurdert basert på simuleringer foretatt i Matlab og målinger gjort av kontaktledningshøyden. Simuleringene i Matlab bekreftet at modellen var stabil og at frekvensen til innsvingningen mot stasjonær tilstand kunne stemme med krav i teknisk regelverk.

Ved hjelp av studier av høydemålinger til kontaktledningen ble svingningene til nedre del av strømavtageren (saksemassen) evaluert. Målevognens høydemåleinstrument er slik montert at når den måler kontaktledningshøyden så inkluderer dette høydeforandringene til saksemassen, men ikke høydeforandringene til den øvre delen til strømavtageren (toppstykket).

Ut fra fysiske sperrer i systemet er det kjent at høydeforandringen til toppstykket totalt ikke utgjør mer en 3 cm, hvilket også simuleringene viser.

6.2 Vurdering av kontaktledningssystem 20 B

Godheten til kontaktledningssystemet ble vurdert ved å studere dens statiske egenskaper. Det vil si, ved å se nærmere på elastisitetsegenskapene når den ble påtrykt 100 N i hvert enkelt hengetrådpunkt. Elastisitetskurven Figur 5-23 viste en parabel som starter i 0 og har toppunktet ved ca. 70 mm midt i spennet. Alle dataene bortsett fra de mellom utligger og nærmeste hengetråd stemte. Oppløftet på utligger skal i følge tidligere gjennomførte målinger starte på ca. 20 mm, kurven skal synke litt mot nærmeste hengetråd for så å øke frem til midtre del av spennet. Årsaken til at dette ikke stemte i modellen kan være at utligger er litt stiv eller at modellen av utligger er litt for enkel. Ved nærmere studier viste det seg at det lette direksjonsstaket ikke roterte fritt rundt sitt festepunkt på horisontalstaket. En fri rotasjon i x-retning på utliggeren og redusert tvang i y-retning på kontaktledningen resulterte i Figur 5-24. Denne viste at oppløftet på utliggeren var på nesten 6,5 cm. Oppløftet ellers i spennet øker ikke merkbar. Det ble dessverre ikke tid til å implementere disse endringene i modellene siden dette ble påvist rett før innlevering av oppgaven.

6.3 Vurdering: Sammenligning av kontaktkreftene

Simuleringene av de utviklede modellene har gitt resultater som løser oppgavens problemstilling. I tillegg er det funnet følgende avvik som er listet opp i slutten av dette avsnittet.

Godheten til kraftbeltet ble vurdert ved å studere middelkreftene og standardavviket. Disse vurderingene ble gjort for en modell med en og to strømvtagere for toghastigheter på 100, 130 og 160 km/h. Simuleringene ble også sammenlignet med målinger gjort på kontaktledningssystem 20 B med strømvtager WBL 88.

Simuleringen av en strømvtager viste at middelkraften:

- ved 100 km/h (64,9 N) er innenfor Jernbaneverkets krav på 60 og 75 N
- ved 130 km/h (61,17 N) er litt lavere enn Jernbaneverkets krav på 65 N
- ved 160 km/h (61,6 N) er litt lavere enn Jernbaneverkets krav på 75 N

Simuleringen av to strømvtagere med 65 meters mellom viste at middelkraften:

- ved 100 km/h (67,6 N) er innenfor Jernbaneverkets krav på 60 og 75 N
- ved 130 km/h (60,67 N) er lavere enn Jernbaneverkets på 65 N
- ved 160 km/h (62,66 N) er lavere enn Jernbaneverkets på 75 N

Simuleringen av to strømvtagere med 30 meters mellom viste at middelkraften:

- ved 100 km/h (56,98 N) er lavere enn Jernbaneverkets krav på 60 og 75 N
- ved 130 km/h (58,14 N) er lavere enn Jernbaneverkets på 65 N
- ved 160 km/h (57,25 N) er lavere enn Jernbaneverkets på 75 N

Simuleringen av en strømvtager viste at standardavviket:

- ved 100 km/h ($S=12,27$ N) er innenfor Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 15 N
- ved 130 km/h ($S=13,15$ N) er innenfor Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 16 N
- ved 160 km/h ($S=13,7$ N) er innenfor Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 17 N

Simuleringen av strømvtager 2, 65 meter bak strømvtager 1 viste at standardavviket:

- ved 100 km/h ($S=15,48$ N) er innenfor Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 15 N
- ved 130 km/h ($S=14,6$ N) er innenfor Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 16 N
- ved 160 km/h ($S=15,23$ N) er innenfor Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 17 N

Simuleringen av strømvtager 2, 30 meter bak strømvtager 1 viste at standardavviket:

- ved 100 km/h ($S=16,15$ N) er over Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 15 N
- ved 130 km/h ($S=15,73$ N) er innenfor Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 16 N
- ved 160 km/h ($S=18,16$ N) er over Jernbaneverkets krav til største standardavvik på 17 N

Simuleringen av to strømvtagere med 65 og 30 meters mellomrom viste at grenseverdiens minste middelkraft:

- $F_{\text{mid}} - (3 \cdot S)$ er lavere enn Jernbaneverkets krav ved passering av to strømvtagere med 65 og 30 meters mellomrom for hastighetene 100, 130 og 160 km/h
- $F_{\text{mid}} - (3 \cdot S)$ er under 10 N ved passering av to strømvtagere med 30 meters mellomrom

Simuleringen av to strømvtagere med 65 og 30 meters mellomrom viste at grenseverdiens største middelkraft:

- $F_{\text{mid}} + (3 \cdot S)$ er innenfor Jernbaneverkets krav for samtlige simuleringer

Simuleringene av kontaktkreftene med to strømvtagere med en avstand på 65 meter viste at de totale kreftene på strømvtager 2 er noe større enn de totale kreftene på strømvtager 1. Ved 100 km/h viste det seg at strømvtager 2 har størst variasjon i kontaktkreftene, mens det er likt for strømvtager 1 og 2 ved 160 km/h.

De minste kontaktkreftene, standardavviket og grenseverdiens minste middelkraft utmerket seg spesielt for 2 strømvtagere med 30 meter avstand. De minste kontaktkreftene var lavere enn 10 N ved 100 km/h, men ved økende hastighet økte verdien på de minste kontaktkreftene. De lave kontaktkreftene gir rom for fraslag og er ikke ønskelig. Standardavviket overskred kravene og grenseverdiens minste middelkraft lå langt under gitt grenseverdi. Siden grenseverdiens minste middelkraft avviker med opptil ca. 18 N ved 160 km/h vil selv forbedringer i modellen ikke kunne gi aksept for en slik avstand mellom strømvtagerne.

Avvik i modellen:

Følgende avvik er registrert i modellen:

- Elastisiteten på utliggerne avvek fra elastisitetskurven for dette systemet.
- Øyeblikksmålingene på utligger og midt i spennet påviste ingen bølgeutbredelse i forkant av strømvtageren.
- Oppløftet av utliggeren mellom to strømvtagere er for stort i forhold til oppløftet i det strømvtageren passerer utliggeren.
- Middelkreftene var generelt litt for lave i forhold til Jernbaneverket sine krav og i forhold til målingene presentert i kapittel 3.
- Standardavvikene holdt seg innenfor Jernbaneverkets sine krav, men var noe høye i forhold til målingene presentert i kapittel 3.

6.4 Forslag til videre arbeider

Simuleringsmodellen er ikke komplett og kan utvides på følgende områder for å kunne studere det totale samvirke mellom kontaktledningsnettet og strømvtagere:

- Modell for å simulere ujevnheter i sporet (kan danne grunnlag for forslag til videre arbeid – langbølger i spor)
- Modell for å simulere kurvatur
- Modell for bevegelse av togtaket (vognkassens krengeing)
- Modellere kjøreretningen på strømvtageren med åpent og lukket kne
- Programmet kan gjøres mer brukervennlig med tanke på at parametere lett kan justeres

Det kan også være interessant å se på andre system og strømvtagere enn det som er studert i denne oppgaven. Det kan utvikles en:

- Modell av kontaktledningssystem System 20 A (Y-line) eller System 25
- Modell av et vekslingsfelt
- Modell av en annen type strømvtager

Litteraturliste

- [Craig,95] Craig J.J 1995, *Introduction to Robotics, Mechanics and Control*, Siemens
- [Kiessling,Puschmann
,Schmieder,01] Kiessling F., Puschmann R. & Schmieder A., 2001, *Contact lines for Electric Railways*. Publicis Corporate Publishing
- [Lyftingsmo,96] Lyftingsmo Ø., 1996, *Konduktiv støy fra lokomotiv EL16*. Hovedoppgave NTH
- [Hallingstad,00] Hallingstad O., 2000, *Matematisk modellering av dynamiske system*,Unik
- [Sture,93] Sture P., 1993, *Lærebok for kontaktledningsingeniører*, NSB Baneteknisk kontor
- [Thoresen,91] Thoresen T E., 1991, *Lærebok i kontaktledningsanlegg*” NSB Baneteknisk kontor
- [Cook,Malkus,Plesha,89] Robert D. Cook, David S. Malkus & Michael E. Plesha, 1989 *Concepts and applications of finite element analysis, third edition*, Wiley
- [Persen,64] Perssen L. N. , 1964, *Mekanikk – Likevektslære*, Tapir
- [Teknisk regelverk,04]
- JD 542 2004 kapittel 5, *Regler for vedlikehold – Kontaktledning og krav til krefter mellom strømvaktaker og kontakttråd*, Jernbaneverket Infrastruktur
 - JD 540 2008, *Regler for prosjektering*, Jernbaneverket Infrastruktur
- [Siemens,93] Siemens 1993, *Kontaktledningsanlegg for NSB, System 20 – Systemoversikt med beregninger*, Siemens
- [Franklin,Powell,Naeini,94] Gene F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini 1994, *Feedback control of dynamic systems*, revisjon 3, Addison-Wesley Publishing Company
- [Lundbäck,04] Lundbäck S., 2004, *Manual för BARTRAD – bärtrådsberäkningsprogram version 2.49*, Banverket
- [Borg,05] Borg K., 2005, *Manual Papasim Version 1.0, Doknr. ELDOK 04-34*, Banverket

- [Eriksson,05] Eriksson B., 2005, *Type testing of pantograph WBL 85, For Målevogn, Jernbaneverket Norway*, Report200204012, Schunk Nordiska
- [Reijm,06] Reijm M., 2006, *Analys av kontaktledningsdynamik Del 5*, Dok. nr. EL 06/01, Banverket
- [Reijm,06] Reijm M., 2006, *Analys av kontaktledningsdynamik vid flera verksamma strømvtagare Del 4*, Dok. nr. EL06/08, Banverket
- [Nyebak,99] Nyebak M., 1999, *Simulering av samarbeidet mellom strømvtager og kontaktledning*, Jernbaneverket
- [Jernbaneverket,1999] Jernbaneverket, 1999, *Lærebok i Jernbaneteknikk L541, Kapittel 4, Dynamisk systembeskrivelse*, Jernbaneverket

Appendiks A

Symboler

δx_1	Høydeforandringen til masse 1
δx_2	Høydeforandringen til masse 2
\dot{x}	Tilstandslikningen til system $f(x,u)$
\dot{x}_1	Hastigheten til masse 1 i z-retning
\dot{x}_2	Hastigheten til masse 2 i z-retning
\ddot{x}_1	Akselerasjonen til masse 1 i z-retning
\ddot{x}_2	Akselerasjonen til masse 2 i z-retning
a	Spennlengden i et kontaktledningsfelt
A	Tverrsnittet til elementene
a_1	Akselerasjonen til masse 1
a_2	Akselerasjonen til masse 2
d_1	Dempningskonstant til masse 1 på strømvavtageren
d_2	Dempningskonstant til masse 2 på strømvavtageren
$d\omega$	Vinkelakselerasjonen
E	Young's modulus (Elastisitet)
f	Frekvens
f_1	Friksjonskraften til saksearmen
f_3	Den ulineære friksjonskraften mellom masse 2 og masse 1
f_4	Kontaktkraften mellom kontaktledningen og masse 2
F_d	Aerodynamisk kraft på saksearmen på strømvavtageren
F_k	Kraften fra kontaktledning ned på toppstykket
F_{mid}	Middelkraften
F_s	Statisk kraft på strømvavtageren
F_{tot}	Kraften fra toppstykket opp på kontaktledning
F_x	Kraft i x-retning
F_y	Kraft i y-retning
F_z	Kraft i z-retning
g	Gravitasjonen til elementene
H_F	strekkraften i kontakttråden
H_T	strekkraften i bærelinen
k_1	Friksjonselementenes fjærkonstant 1
k_2	Fjærkonstant mellom masse 1 og 2 på strømvavtageren
k_3	Fjærkonstant mellom masse 1 og 2 på strømvavtageren
k_4	Fjærkonstant mellom masse 2 og kontaktledningen til strømvavtageren
l_1	Lengden til
l_2	Lengden til
l_3	Lengden til
l_4	Lengden til
I_1	Tregghetsmomentet til link 1
I_2	Tregghetsmomentet til link 2
M_1	Spinnsatsen til link 1
M_2	Spinnsatsen til link 2
m_1	Masse 1 til strømvavtageren (toppstykket)
m_2	Masse 2 til strømvavtageren (saksearmen)

m_3	Masse 3 er simulert kontaktledningsmasse
R_b	Rotasjonsmatrisen til koordinatsystem b
R_x	Begrensning i x-retning
R_y	Begrensning i y-retning
R_z	Begrensning i z-retning
S	Standardavvik
t	Tiden toget bruker på distansen x
τ	Tidskonstant for tiden til en amplitude
T_b	Tregghetsmatrisen til koordinatsystem b
u	Global forflytning i x-retning
v	Global forflytning i y-retning
V_0	Hastigheten til toget
v_1	Hastigheten til masse 1
v_2	Hastigheten til masse 2
w	Global forflytning i z-retning
x	Togets tilbakelagte distanse
x_1	Høyden fra grunnrammen og opp til masse 1
x_{1s}	Stasjonær høyde til masse 1
x_2	Høyden fra grunnrammen og opp til masse 2
x_{2s}	Stasjonær høyde til masse 2
x_3	Høyden fra grunnrammen og opp til kontaktledningen
x_g	Toppstykkets translasjon i z-retning, grensehøyden til masse 2
$x_{g,min}$	Minimal grensehøyde
$x_{g,maks}$	Maksimal grensehøyde
y	Avstanden mellom to kontakttråder i et seksjonsfelt
y_s	Sikksakk avstanden
α	Termisk utvidelse koeffisient
β	Stivhetsdempningsparameter
δx	dx i Matlabnotasjon
δx_1	Høydeforandringen til masse 1
δx_2	Høydeforandringen til masse 2
δx_3	Høydeforandringen til kontaktledningen
θ_1	Rotasjonsvinkelen for link 1
θ_2	Rotasjonsvinkelen for link 2
θ_3	Rotasjonsvinkelen for link 3
ξ	Dempningsfaktor til kontaktledning
ρ	Tettheten til materialet
σ_{dm}	Massedempningsparameter
σ_{ni}	Opprinnelig belastning
ω	Vinkelhastighet
ω_d	Dempningsfrekvens

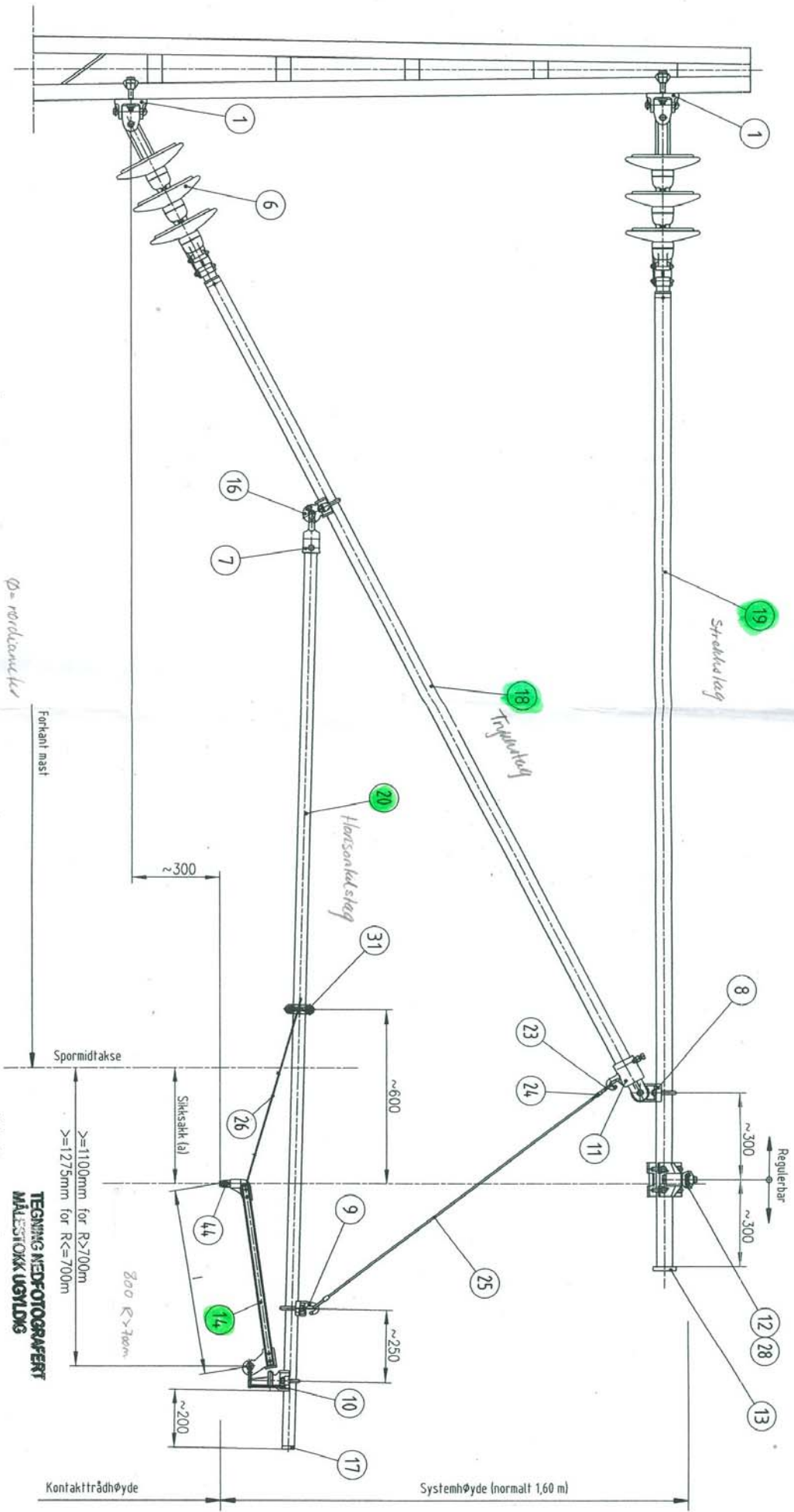
Definisjoner og forkortelser

Følgende definisjoner og forkortelser er brukt i denne rapporten:

Definisjon	Forklaring
Beamelement	Se definisjon for bjelkeelement
Bjelkeelement	Stivt legeme som ikke får utbøyning og kalt beamelement i Comsol.
Bæreline	Dette er en line som er oppstruktet over kontakttråden for å bære kontakttråden
Direksjonsstag	Konstruksjon som holder kontakttråden i horisontalplanet
Elastisitet	Kontakttrådens løfting målt eller beregnet i forhold til påkjenningen/kontaktkraften
Fraslag	Strømvtageren mister kontakt med kontakttråden
Hengetråd	Dette er de vertikale trådene mellom kontakttråden og bærelinen.
Kabelelement	Legeme som får utbøyning, også kalt lineelement eller trusselement i Comsol.
Kontaktledning	Dette er kontakttråd, bæreline, hengetråder og/eller hengere.
Kontaktledningsanlegg	Det komplette anlegg med samtlige ledninger, kabler, master, åk, fester, sugetransformatorer, skinneforbindere, jordledning osv.
Kontaktkraft	Kreftene som virker på kontaktledningen når strømvtageren samvirker med kontaktledningen.
Kontakttråd	Tråd som er opphengt over sporet, og som strømvtagerens kontaktstykker glir mot.
Kontakttrådshøyde	Høyden fra skinneoverkant og opp til festet kontakttråd på utligger.
Kraftbelte	De målte kontaktkreftene på en bestemt strekning hvor maksimal- og minimalverdier for kontaktkreftene fremkommer.
Lysbue	For små kontaktslipp mellom strømvtager og kontaktledning opprettholdes strømmen gjennom en lysbue hvis strømmen er stor nok.
Målevogn	Skinnegående vogn med utstyr for måling av sporets tilstand i fart.
Nedheng	Den loddrette avstand mellom kontakttråden og den rette linje mellom dens opphengingspunkter når kontakttråden er under denne linje.
Oppløft	Kreftene som gjør at kontaktledningen løftes opp i forhold til opprinnelig posisjon.
Parallellfelt	Spennlengde med 2 parallelle kontakttråder. Fellesbetegnelse for seksjonsfelt og vekslingsfelt.
Pilhøyde	Nedheng
Seksjon	Del av kontaktledning som ved hjelp av bryter kan adskilles elektrisk fra den øvrige delen.
Seksjonering	Elektrisk oppdeling av kontaktledningen med seksjonsfelt eller seksjonsisolator.
Seksjonsfelt	Vekslingsfelt hvor to seksjoner er elektrisk isolert fra hverandre.

Definisjon	Forklaring
Sikksakk	Kontakttråden er lagt opp med sikksakk, det vil si at kontaktledningen trekkes en bestemt avstand ut i fra spormidt for å få en mest mulig jevn slitasje på kullet og for å forlenge spennviddene i kurver.
Spennlengde	Dette er den maksimale lengde mellom utliggerne
Systemhøyde	Avstand mellom senter bæreline og senter kontakttråd målt ved utligger.
Spormidt	Det området som utgjør midtpunktet mellom to skinner i et spor.
Truss-element	Se definisjon for kabelelement
Utliggere	Konstruksjon som bærer kontaktledningen og som er isolert fra festepunktene.
Vekslingsfelt	Et spenn hvor to møtende kontaktledningsparter er ført parallelt før de avspennes.
Kinematikk	Dette er læren om bevegelse. Dette er forholdet mellom leddenes posisjoner, hastigheter og akselerasjoner uten å ta hensyn til de bevegende kreftene, det vil si uten å betrakte årsaken eller virkningen av bevegelsene – mekanikk.
Kinetikk	Behandler samvirke mellom kreftene og den bevegelsen de forårsaker – dynamikk.
0-nivå	Kontaktledningens høydereferanse uten nedheng.
Y-line	Kort line som bærer horisontalstaget og kontakttråden ved utligger.

Forkortelse	Beskrivelse
AH	Konsollhøyde
AU	Trykkstag
BL	Bæreline
FEM	Finite Element Method
FH	Kontakttrådhøyde
H	Hengetråd
KL	Kontaktledning
KS	Koblingsstag
KT	Kontakttråd
MVK	Avstand forkant mast til kontakttråd
NS	Nedre saksearm
ODE	Ordinær differensiallikning
PS	Parallellstag
SH	Systemhøyde
SP	Strekkstag
ST	Horisontalstag
ØS	Øvre saksearm



Tabell 1

Rørdimensjoner for utførelse A		
Rørtype	Trykkslag	Horisontalstak
Rørdiameter	55	55
		42

Tilførehingsmoment:
pos. 6, 8, 10, 12 og 16: 70 Nm.
pos. 9 og 31: 35 Nm.
pos. 7 og 11: 50 Nm.

Tabell 2

Varianter for bærelinneholder pos.12	
Tegningsnummer	Titel
EK.707214-000	Bærelinneholder for strekstak ø55 og ø70
EK.707521-000	Bærelinneholder fra Siemens for strekstak ø55

1	44	Kontakttråddiameter	EK.707200-000	251.002.50
1	31	Kontaktstørrelse for ø42 og ø55 p1200 m	EK.707207-000	251.405.32
1	28	Størrelse og belastningsklasse for -400A-50	EK.707258-000	251.405.79
1	26	Isolasjon for led. dråge p1200 m	Stålline	251.405.62
1	25	Line 6 mm	3-20.01.01-02	250.231.03
2	24	Presserhøyde 6	EK.707332-000	251.014.69
2	23	Kasse 6 for hengsel og ø42x4	EK.707333-000	251.018.58
2	20	Horisontalstak ø12x4	NRST	
1	18	Strøkstak ø55x6	EK.707291-000	251.401.21
1	18	Trykkslag ø55x6	EK.707291-000	251.401.22
1	17	Phosbratte ø42 for horisontalstak	EK.707289-000	251.401.22
1	16	Phosbratte med byrde, innp. for rør ø55	EK.707314-000	251.802.14
1	14	Lettt. dreieskroingsstak ø45	EK.707198-000	251.405.61
1	13	Phosbratte ø55 for horisontalstak	EK.707289-000	251.405.61
1	13	Phosbratte ø55 for strekstak ø55	EK.707289-000	251.802.13
1	11	Endemuffe for trykstak ø55 kompt.	EK.707204-000	Se tabell 2.
1	11	Endemuffe for led. dråge ø42 kompt.	EK.707202-000	251.405.29
1	10	Isolasjon for trykstak ø55 kompt.	EK.707302-000	251.405.54
1	9	Isolasjonholder for horisontalstak ø42	EK.707208-000	251.405.34
1	8	Holder for trykstak for rør ø42	EK.707202-000	251.405.20
1	7	Endemuffe m/krok for rør ø42	EK.707198-000	251.405.20
2	6	Utliggerisolerator	EK.707454-000	
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60
2	1	Utl. isolert ø42 for normal B/H-mat	EK.707167-000	249.801.60

TEKNISSKIP FOTOGRAFERT
MALESTOKK UØVLIG

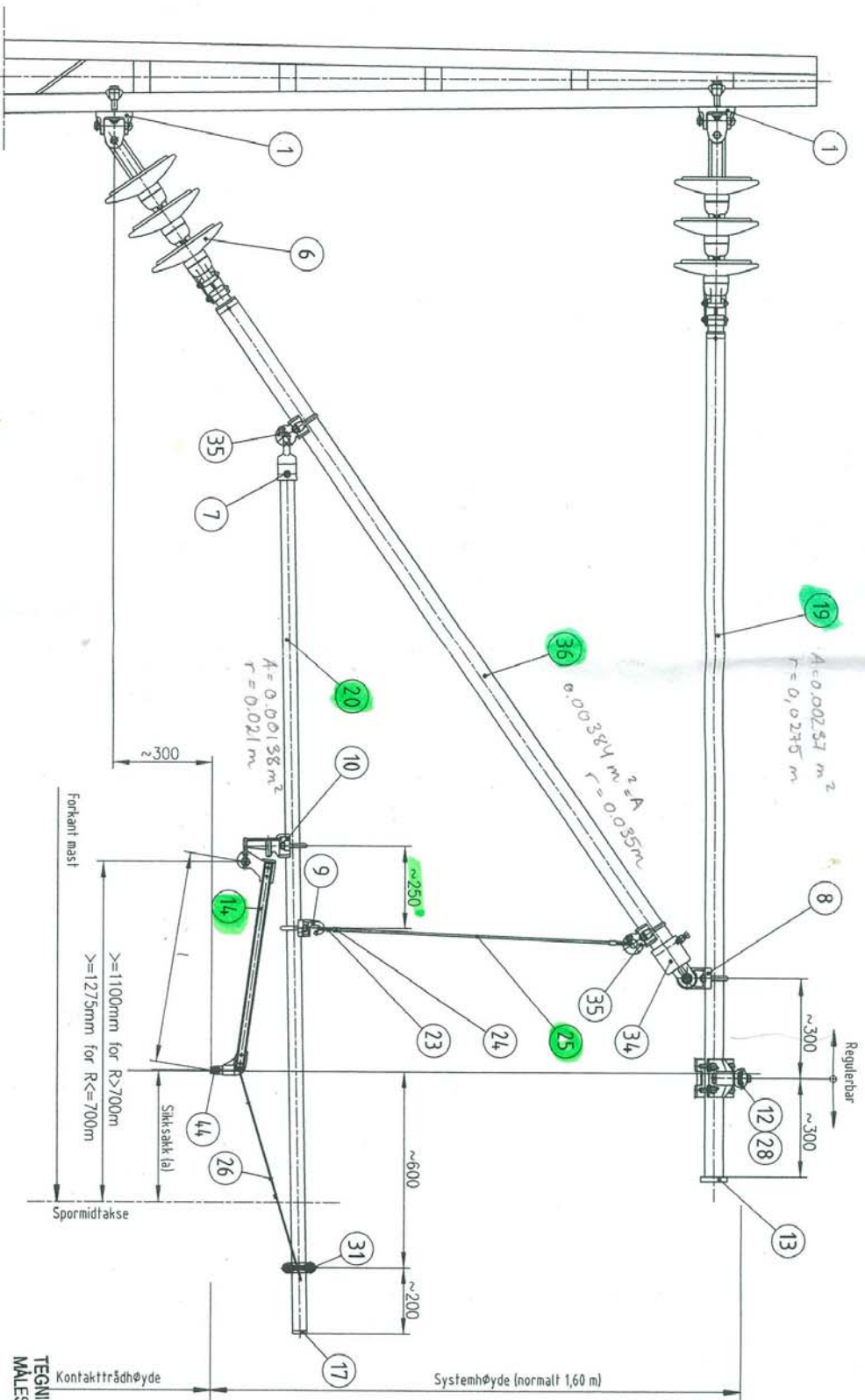
Merkeholder:
Utliggerutløst er anhengt av kurveradius, utliggerlengde, systemhøyde og siktsak.
For beregninger av utliggerlengde og monteringsplan, se resultatet fra beregningsprogram godkjent av Jernbaneverket.
Konseller, pos. 1, er anhengt av mastetype og strøklasse.
Bærelinneholder EK.707214-000 og EK.707521-000, pos. 12, går ikke om hverandre. De kan erstattes hverandre men da må utliggeren beregnes på nytt eller justeres manuelt.
Vindhenger er anhengt av strekstak, radius og type utligger. Ikke alle utligger skal ha vindhenger, se kuttetabell.

003 10x, tabel/beregninger, annet. Pos.12 oppført med to varianter 04.06.04 JHT-H
2 Pos.24 f.m. endret og pos.44 er ny 02.03.99 HHH
1 IV, stykkliste 23.11.98 HHH
Rev. Modifisering gjelder

Normalutligger, trykkbelastet
Utløst av system 20
Sammenstillingstegning

Jernbaneverket

Tegning av EK.707173-000 003



Tabell 1

Røringsnummer	Tryk- slag	Stræk- slag	Horizontal- slag
Rørdiameter	70	55	42

Tiltrekningsmoment:
pos. 6, 8, 10, 12 og 35: 70 Nm.
pos. 9 og 31: 35 Nm.
pos. 7 og 34: 50 Nm.

Tabell 2

Varianter for bærelinjeholder pos.12

Tegningsnummer	Titel	F.nr.
EK.707214-000	Bærelinjeholder for strekkslag ø55 og ø70	251.405.4.1
EK.707521-000	Bærelinjeholder fra Siemens for strekkslag ø55	251.405.4.7

1	144	Kontakttrådlederne	EK.707200-000	251.002.50
2	36	Trykledning ø70x8	EK.707291-000	251.401.23
2	35	Øjernet med bøjle kompletter ø70	EK.707514-000	251.405.60
1	34	Endemuffe, trykledning y/h.h. ø70	EK.707206-000	251.405.31
1	31	Vindstærke for ø42 og ø55 >1200 m	EK.707207-000	251.405.32
1	28	Støt og ledningslænke for 1400-50 m	EK.707258-000	251.405.79
1	26	Vindledning for lilt dråning >1200 m	EK.707515-000	251.405.62
2	25	Linje 8 mm	NRST	250.231.03
2	24	Presserhjul 8	EK.707333-000	251.014.69
2	23	Kause 6 for klempeklod og ø42	EK.707333-000	251.018.38
2	20	Horisontalstøt ø42x4	EK.707291-000	251.401.21
1	19	Strekkslag ø55x6	EK.707291-000	251.401.22
1	17	Posthjul ø42 for horisontalstøt	EK.707289-000	251.602.14
1	14	Lett drejningsstøt	EK.707198-000	251.602.14
1	13	Posthjul ø42 for horisontalstøt	EK.707289-000	251.602.13
1	12	Bærelinjeholder for strekkslag ø55	EK.707289-000	251.602.13
1	10	Holder for lilt dråning ø42 kompl	EK.707302-000	251.405.54
1	9	Hængelåser for horisontalstøt ø42	EK.707208-000	251.405.34
1	8	Holder for strekkslag, rør ø55	EK.707202-000	251.405.25
1	7	Endemuffe m/krok for rør ø42	EK.707196-000	251.405.20
2	6	Udliggerisolator	EK.707454-000	249.801.60
2	1	Udløst m/hold for normal/H-mast	EK.707167-000	251.405.62

Normalutligger, strekkelastet

Utlørelse B system 20

Sammenstillingstegning

Pos.	Pos. 12	Pos. 14	Pos. 16	Pos. 18	Pos. 20	Pos. 22	Pos. 24	Pos. 26	Pos. 28	Pos. 30	Pos. 32	Pos. 34	Pos. 36	Pos. 38	Pos. 40	Pos. 42	Pos. 44	Pos. 46	Pos. 48	Pos. 50
003	003	003	003	003	003	003	003	003	003	003	003	003	003	003	003	003	003	003	003	003

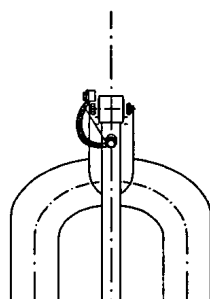
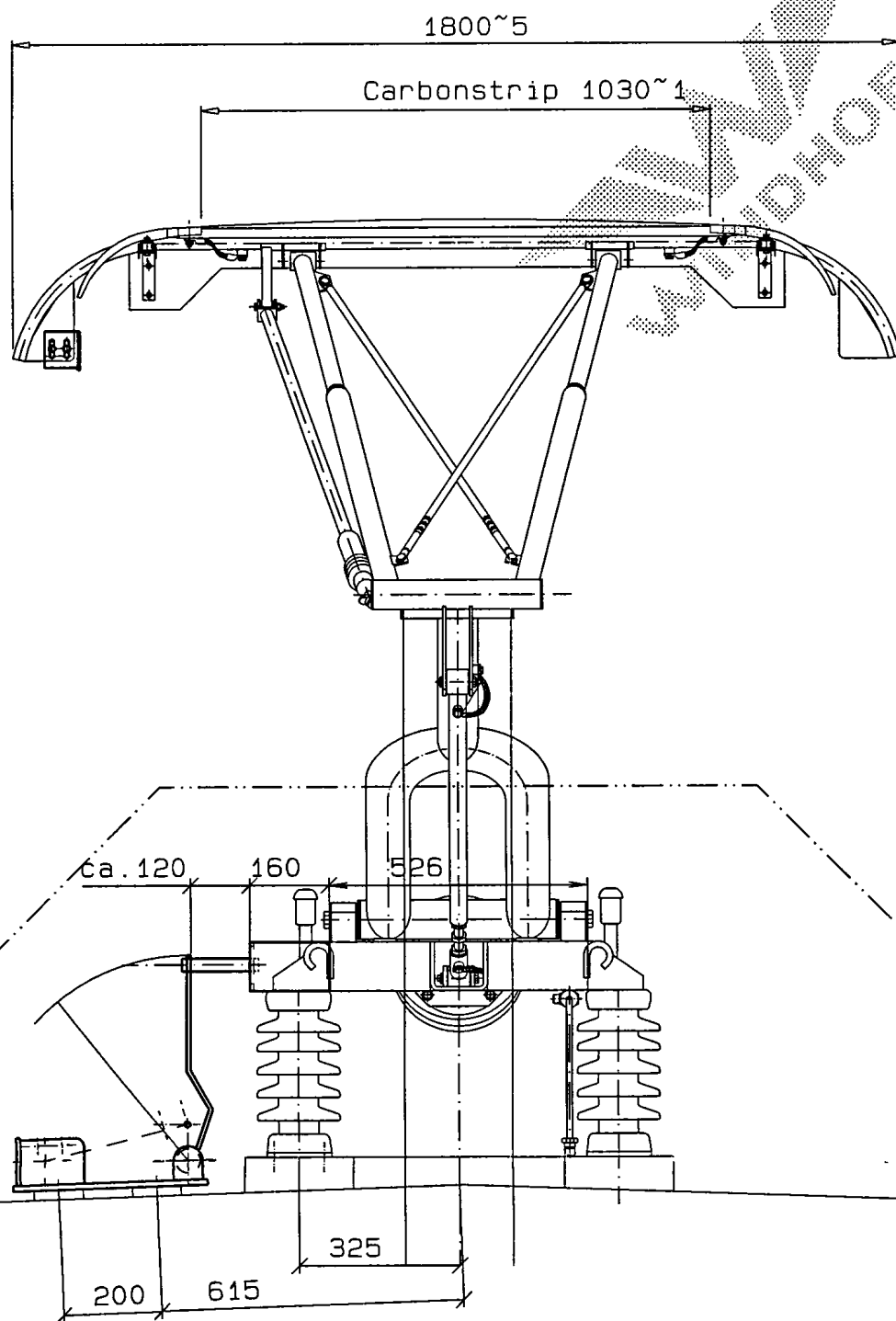
Jernbaneverket

EK.707172-000 003

TEGNING NEDFOTOGRAFERET
MALESTOKK UGVLIDIG

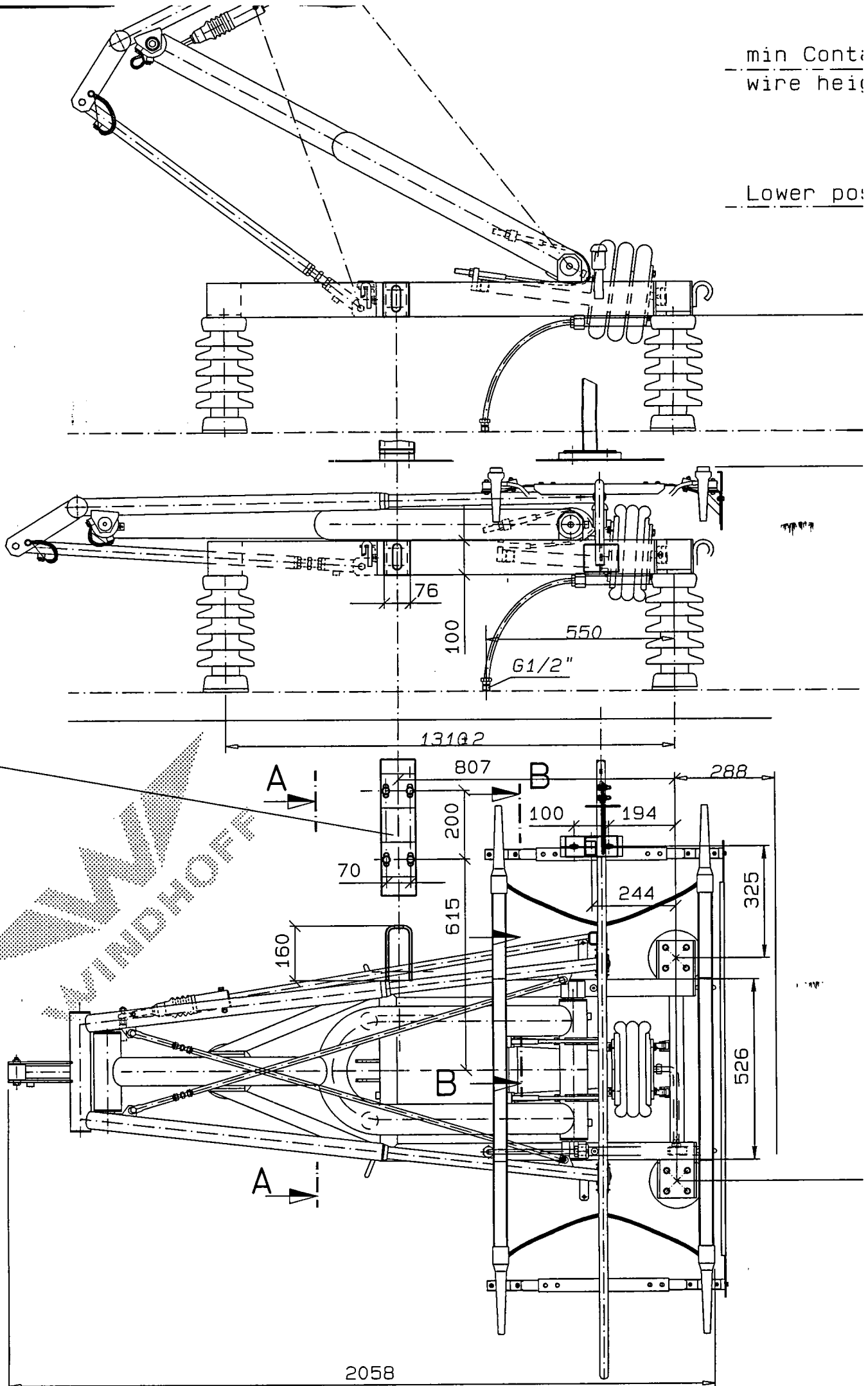
Notat den 30. jan

Schnitt A-A



min Cont:
wire hei

Lower pos



HENGSETRALYTA BELT FOR AVSPENNINGS- OG SEKSJONSPRØV. Kontraktid 80 eller 100 mm². Merketid 50 mm². Strøkfördelning 100/50 mm²: 62%/500 kg. 80/50 mm²: 69%/452 kg. Ballensveit tagna 1909. tabell nr 55.

Hængseltred nr.:												spænningslængde m
0		1		2		3		4		5		
afstand fra kjoerbear udl. m	længde cm	afstand fra kjoerbear udl. m	længde cm	afstand fra kjoerbear udl. m	længde cm	afstand fra kjoerbear udl. m	længde cm	afstand fra kjoerbear udl. m	længde cm	afstand fra kjoerbear udl. m	længde cm	
181	151	11,17	103	21,34	80	31,50	82	41,67	106	51,84	138	
181	152	11,-	106	21,-	83	31,-	86	41,-	110	51,-	140	
180	152	10,84	108	20,68	86	30,50	89	40,34	113	50,18	142	
180	152	10,68	110	20,36	89	30,-	93	39,68	117	49,36	144	
179	152	10,50	112	20,-	92	29,50	97	39,-	120	48,50	146	
179	152	10,34	114	19,68	96	29,-	100	38,34	124	47,68	149	
178	152	10,17	116	19,34	99	28,50	104	37,67	127	46,84	151	
178	152	10,-	118	19,-	102	28,-	107	37,-	131	46,-	153	
177	153	9,84	121	18,68	105	27,50	111	36,34	135	45,18	155	
177	153	9,67	123	18,34	108	27,-	115	35,67	138	44,34	158	
176	153	9,50	125	18,-	111	26,50	118	35,-	144	43,50	160	
176	153	9,34	127	17,68	114	26,-	124	34,34	145	42,68	162	
175	153	9,17	129	17,34	117	25,50	126	33,67	148	41,84	164	
175	153	9,-	131	17,-	121	25,-	129					
174	153	8,84	134	16,68	124	24,50	133					
174	154	8,67	136	16,34	127	24,-	137					
173	154	8,50	138	16,-	130	23,50	140					
173	154	8,34	140	15,68	133	23,-	144					

62	181	151	11,17	103	21,34	80	31,50	82	41,67	106	51,84	138	62
61	181	152	11,-	106	21,-	83	31,-	86	41,-	110	51,-	140	61
60	180	152	10,84	108	20,68	86	30,50	89	40,34	113	50,18	142	60
59	180	152	10,68	110	20,36	89	30,-	93	39,68	117	49,36	144	59
58	179	152	10,50	112	20,-	92	29,50	97	39,-	120	48,50	146	58
57	179	152	10,34	114	19,68	96	29,-	100	38,34	124	47,68	149	57
56	178	152	10,17	116	19,34	99	28,50	104	37,67	127	46,84	151	56
55	178	152	10,-	118	19,-	102	28,-	107	37,-	131	46,-	153	55
54	177	153	9,84	121	18,68	105	27,50	111	36,34	135	45,18	155	54
53	177	153	9,67	123	18,34	108	27,-	115	35,67	138	44,34	158	53
52	176	153	9,50	125	18,-	111	26,50	118	35,-	144	43,50	160	52
51	176	153	9,34	127	17,68	114	26,-	124	34,34	145	42,68	162	51
50	175	153	9,17	129	17,34	117	25,50	126	33,67	148	41,84	164	50
49	175	153	9,-	131	17,-	121	25,-	129					49
48	174	153	8,84	134	16,68	124	24,50	133					48
47	174	154	8,67	136	16,34	127	24,-	137					47
46	173	154	8,50	138	16,-	130	23,50	140					46
45	173	154	8,34	140	15,68	133	23,-	144					45

Hængestrådene nr 4 og 5 har fra ca 50 m spændelængde og nedover ingen belastning og kan derfor sløjfes.

I spænd med en udligger forkortes hængestråd nr 3 med 3 cm.

"	"	den	"	"	"	3	"	5	"	"
---	---	-----	---	---	---	---	---	---	---	---

Appendiks B

Beregning av stasjonære verdier

Strømvapteren befinner seg i stasjonær tilstand ved følgende tilfeller:

- Hastigheten til toget $v=0$
- Hastigheten til toget $v=\text{konstant}$

Når hastigheten til toget er lik null og masse 1 eller masse 2 løftes med en viss høyde fra stasjonær høyde, vil strømvapteren svinge seg inn til stasjonær høyde etter en gitt tid. Når hastigheten til toget er konstant vil strømvapteren svinge rundt en stasjonær høyde som er litt større enn høyden ved $v=0$. Dette er fordi strømvapteren løftes litt høyere opp på grunn av den aerodynamiske kraften.

De numeriske verdiene settes inn i likning 4.32 og 4.33:

$$\delta \ddot{x}_1 = \frac{-2004400 \cdot \delta x_1 + 4400 \cdot \delta x_2 - 139,1 \cdot \delta \ddot{x}_1 + 75,6 \cdot \delta \ddot{x}_2}{19,7} \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$\delta \ddot{x}_2 = \frac{1004400 \cdot \delta x_1 - 1104400 \cdot \delta x_2 + 75,6 \cdot \delta \ddot{x}_1 - 75,6 \cdot \delta \ddot{x}_2 - f_3 + f_4}{6,6} \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

For $v=0$, $t=0$ og $F_d=0$:

Ved å sette alle variable ledd i likningene 4.28 og 4.29 lik 0, kan vi beregne de stasjonære verdiene. Det antas at systemhøyden ved den første utliggeren er 5,6 meter over bakken. I forhold til referansehøyden utgjør dette en høyde x_3 på 1,2 meter.

Vi antar følgende verdier ved stasjonær tilstand:

- $f_3 = 0$
- $f_4 = 0$
- $f_d = 0,00648v^2=0$

$$\delta \ddot{x}_1 = \frac{(k_2 \cdot (x_{2s} + \delta x_2 - (x_{1s} + \delta x_1)) + d_2 \cdot (x_{2s} + \delta \ddot{x}_2 - (x_{1s} + \delta \ddot{x}_1)) - k_1 \cdot (x_{1s} + \delta x_1) - d_1 \cdot (x_{1s} + \delta \ddot{x}_1) + f_1 \cdot \text{sign}(x_{1s} + \delta x_1) + f_3 \cdot (x_{1s} + \delta x_1, x_{2s} + \delta x_2) - F_d - F_s)}{m_1}$$

$$\delta \ddot{x}_2 = \frac{(-k_2 \cdot (x_{2s} + \delta x_2 - (x_{1s} + \delta x_1)) - d_2 \cdot (x_{2s} + \delta \ddot{x}_2 - (x_{1s} + \delta \ddot{x}_1)) - f_3(x_1, x_2) + f_4(x_2, x_3))}{m_2}$$

På bakgrunn av disse likningene kan X_{1s} og X_{2s} beregnes.

$$x_{2s} = \frac{38 + 2004400 \cdot x_{1s}}{1004400} \quad B.1$$

$$x_{1s} = -\left(\frac{120000 - 104400 \cdot x_{2s}}{4400}\right) \quad B.2$$

Ved å sette inn for x_{1s} i likning B.1 kan x_{2s} beregnes:

$$x_{1s} = 0,5885$$

$$x_{2s} = 1,17$$

Verdiene som er beregnet her representerer den stasjonære høyden i forhold til referansehøyden til rammen på strømvatageren og er i forhold til massesentrene til nedre og øvre saksearm.

For v =konstant (100 km/h) og $F_d=5$:

Tilsvarende beregning er nødvendig å gjøre for å finne de stasjonære verdiene når den aerodynamiske kraften F_d og interaksjonskraften f_4 virker inn.

Det antas følgende verdier ved stasjonær tilstand:

- $f_3 = 0$
- $f_4 = ?$
- $f_d = 0,00648v^2 = 5$

Likning B.1 og B.2 blir omformet. Videre utregning er ikke vist da det ikke er sikkert hva f_4 er ved stasjonær tilstand:

Tabell B-1 Parametere ved stasjonær tilstand

Parameter	Verdi		Enhet
	V=0 km/h	V=100 km/h	
x_{1s}	0,5885	?	m
x_{2s}	1,17	?	m
x_{kl}	1,2	Variabel	m
x_{ref}	4,4		m
x_s	5,6		m
x_{tak}	4	4	m
x_{maks}	2	2	m
x_{ramme}	0,4	0,4	m
$\frac{1}{2} x_{g,maks}$	0,015	0,015	m
δx_1	0	0	mm
δx_2	0	0	mm
δx_3	0	0	mm
δx_g	0	$0 < x_g < 0,03$	mm
f_1	17	17	N
f_3	0	0	N
f_4	$k_4 (\delta x_3 - \delta x_2)$	$k_4 (\delta x_3 - \delta x_2)$	N
F_s	55	55	N
F_d	0	$0,00648v^2$	N
\ddot{x}_1	0	0	ms^{-1}
\ddot{x}_2	0	0	ms^{-1}
\dot{v}_1	0	0	ms^{-2}
\dot{v}_2	0	0	ms^{-2}

Toppstykket kan bevege seg totalt 1,5 cm både opp og ned når det taes utgangspunkt i toppstykkets posisjon ved statisk kraft. Dette tilsvarer en total bevegelsesmulighet på 3 cm.

Appendiks C

Beregning av elastisitetskurve

Sted/punkt	Avstand fra utligger 0 [m]	Opprinnelig nedheng [m]	Nedheng ved påført kraft = 100 N i hvert punkt [m]	Påført kraft [N]	Oppløftet ift opprinnelig nedhengspunkt [m]	Elastisitet
	dx	W_0	W_{100}	F_{100}	W	e
Utligger 0	0,00	-0,000023583	0,00001375	100,00	0,03733	0,00037
Hengetråd 1	5,00	0,003098362	0,01946800	100,00	16,36964	0,16370
Hengetråd 1	12,90	-0,021870881	0,01930000	100,00	41,17088	0,41171
Hengetråd 1	20,75	-0,040830895	0,01919900	100,00	60,02990	0,60030
Hengetråd 1	28,60	-0,050492870	0,01978400	100,00	70,27687	0,70277
Hengetråd 1	36,45	-0,050631102	0,01968800	100,00	70,31910	0,70319
Hengetråd 1	44,30	-0,041237830	0,01891200	100,00	60,14983	0,60150
Hengetråd 1	52,15	-0,022525625	0,01886700	100,00	41,39263	0,41393
Hengetråd 1	60,00	0,003004885	0,01942600	100,00	16,42112	0,16421
Utligger 1	65,00	-0,000099635	0,00000056	100,00	0,10019	0,00100

Likningen som er benyttet for å beregne oppløftet og elastisiteten:

$$w[mm] = (w_{100} - w_0) \cdot 1000$$

$$e = \frac{w}{100} [mm / N]$$

Beregning av middelkraft

Kontaktkreftene ved de ulike hastighetene er hentet ut fra Comsol:

- Hvert 0,03 sekund ved 100 km/h
- Hvert 0,04 sekund ved 130 km/h
- Hvert 0,05 sekund ved 160 km/h

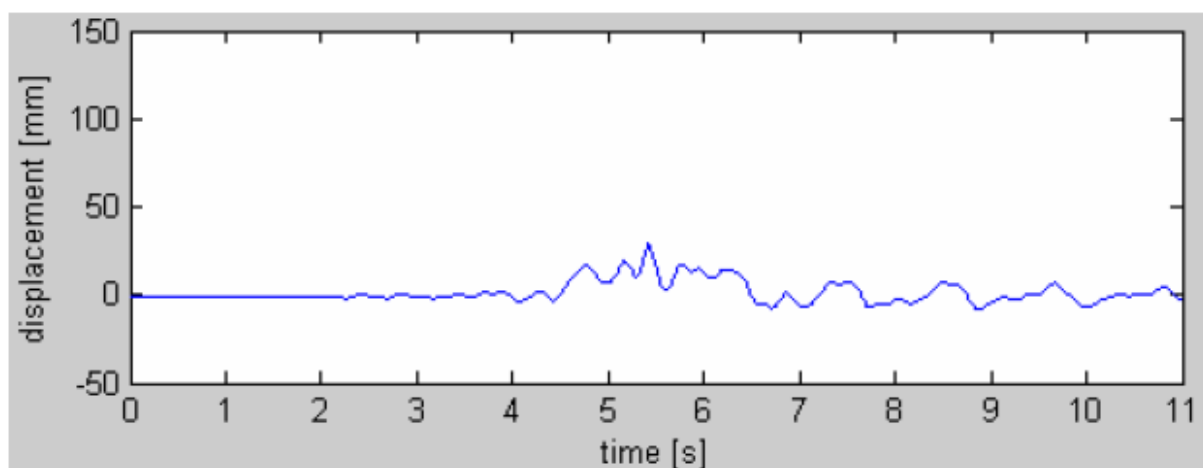
100 km/h		130 km/h		160 km/h	
T [s]	F _{tot} [N]	T [s]	F _{tot} [N]	T [s]	F _{tot} [N]
4,67	66,95	3,60	32,81	2,93	12,83
4,70	35,35	3,62	27,36	2,94	20,99
4,73	47,27	3,64	44,03	2,95	28,06
4,76	48,71	3,66	42,69	2,96	19,76
4,79	42,98	3,68	48,49	2,97	51,67
4,82	32,35	3,70	48,81	2,98	29,68
4,85	33,91	3,72	33,42	2,99	35,31
4,90	50,12	3,74	60,92	3,00	46,81
4,95	55,45	3,76	58,26	3,02	43,53
5,00	53,69	3,78	49,02	3,04	72,42
5,05	58,22	3,80	50,31	3,06	55,61
5,10	66,63	3,84	58,57	3,08	64,58
5,15	73,46	3,88	59,99	3,10	56,42
5,20	70,70	3,92	66,03	3,12	60,34
5,25	67,97	3,96	67,21	3,15	71,07
5,30	61,94	4,00	61,87	3,18	75,72
5,35	64,45	4,04	62,74	3,21	78,23

100 km/h		130 km/h		160 km/h	
T [s]	Ftot [N]	T [s]	Ftot [N]	T [s]	Ftot [N]
5,40	70,63	4,08	64,09	3,24	75,68
5,45	74,32	4,12	62,14	3,27	71,75
5,50	71,46	4,16	63,84	3,30	76,84
5,55	70,49	4,20	60,02	3,33	80,49
5,60	65,13	4,24	58,00	3,36	78,35
5,65	73,37	4,28	59,47	3,39	67,43
5,70	78,56	4,32	58,61	3,42	66,65
5,75	85,46	4,36	60,14	3,45	60,83
5,80	82,11	4,40	65,35	3,48	64,71
5,85	80,19	4,44	64,65	3,51	60,79
5,90	68,46	4,48	69,30	3,54	53,87
5,95	74,65	4,52	75,21	3,57	56,08
6,00	78,54	4,56	79,57	3,60	48,98
6,05	76,34	4,60	84,83	3,63	47,55
6,10	74,57	4,64	78,60	3,66	54,92
6,15	69,02	4,68	76,71	3,69	59,71
6,20	63,30	4,72	80,19	3,72	65,11
6,25	72,87	4,76	76,52	3,75	74,32
6,30	74,97	4,80	73,76	3,78	72,02
6,35	73,66	4,84	71,24	3,81	72,96
6,40	70,92	4,88	67,72	3,84	83,77
6,45	63,83	4,92	69,81	3,87	87,63
6,50	58,01	4,96	71,16	3,90	90,29
6,55	59,26	5,00	69,20	3,93	76,19
6,60	64,94	5,04	58,40	3,96	70,41
6,65	61,58	5,08	60,96	3,99	65,52
6,70	53,84	5,12	57,14	4,02	69,91
6,75	77,93	5,16	57,51	4,05	63,16
6,80	56,15	5,20	43,11	4,08	62,69
6,83	18,70	5,22	38,84	4,11	66,26
6,86	40,66	5,24	32,96	4,14	58,21
6,89	50,09	5,26	46,20	4,17	50,77
6,92	51,12	5,28	65,18	4,19	54,27
6,95	53,53	5,30	49,54	4,21	49,48
6,98	72,69	5,32	53,87	4,23	45,58
7,01	68,36	5,34	51,93	4,25	50,08
		5,36	67,42	4,27	8,78
		5,38	108,67	4,29	79,15
		5,40	35,25	4,30	63,62
				4,31	55,34
				4,32	56,32
				4,33	58,71
				4,34	65,33
				4,35	75,22
				4,36	81,68
				4,37	105,42
				4,38	125,70

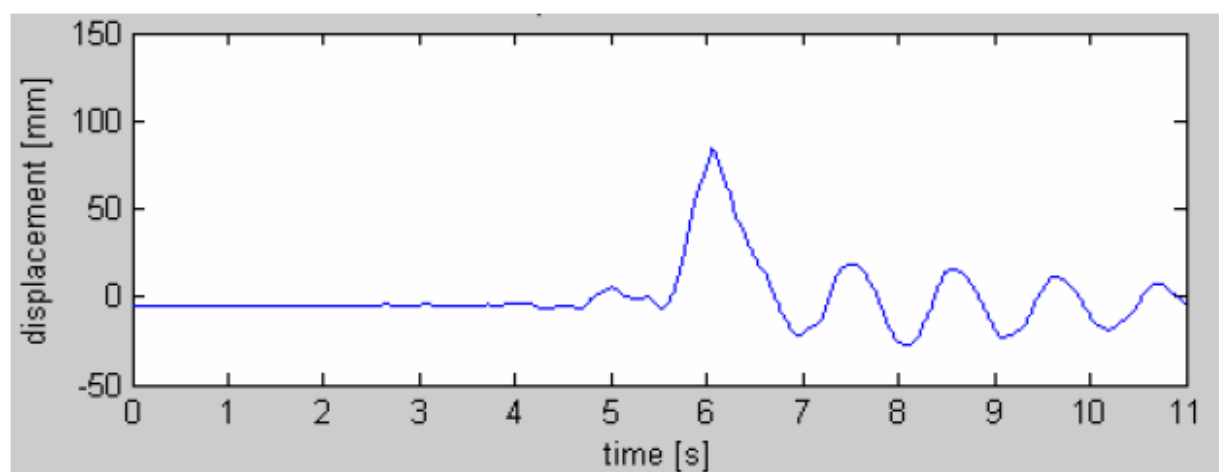
Appendiks D

Simuleringsresultater i Bartrad/Ansys

Simulering av oppløftet til en strømvavtager ved 160 km/h



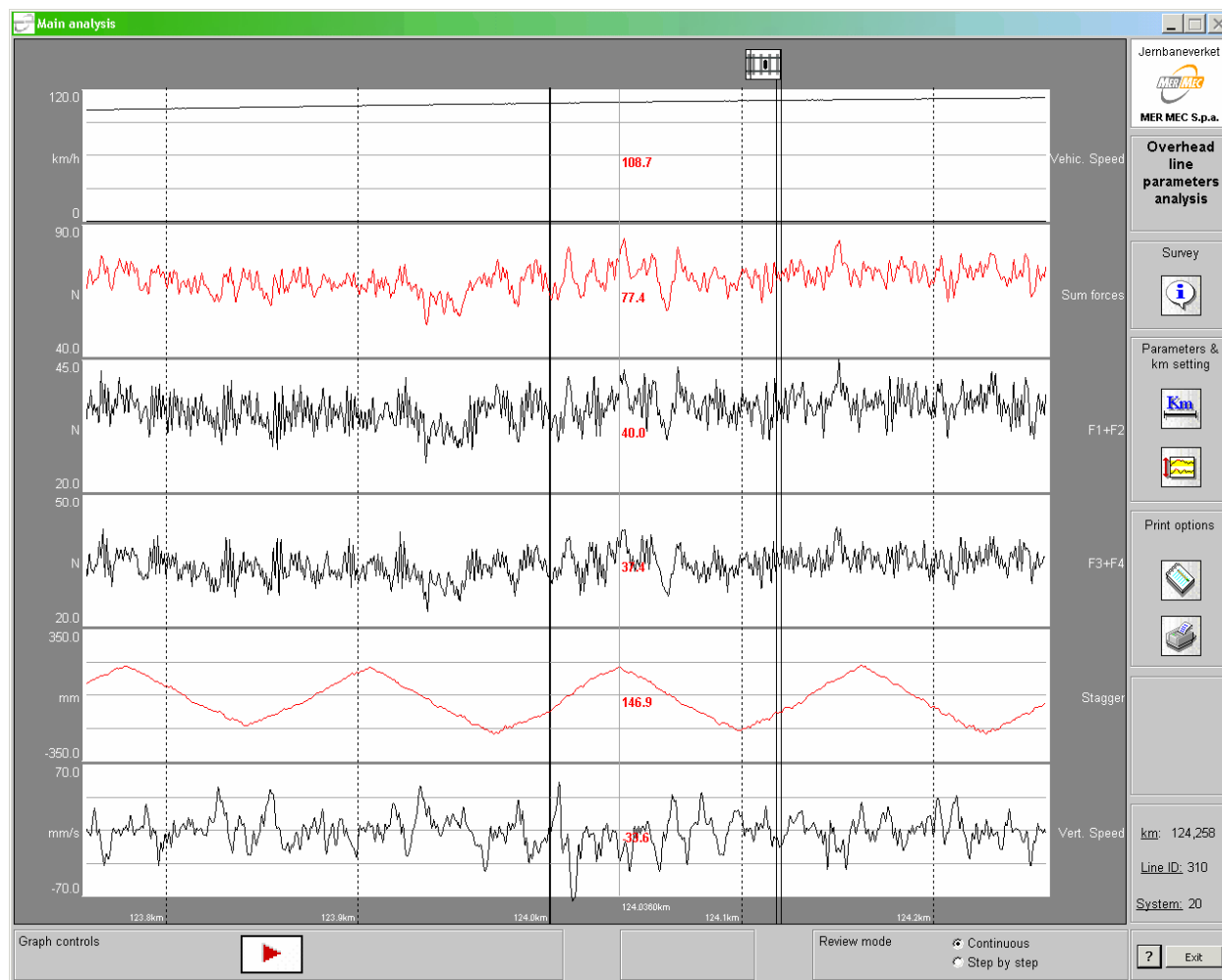
Upplyft ved tillsatsrøret for system 20B med spannlængd 60 m och fordonshastighet 160 km/h (Upptryckskraft = 87 N)



Upplyft på spannmitt för system 20B med spannlængd 60 m och fordonshastighet 160 km/h (Upptryckskraft = 87 N)

Appendiks E

Måleresultater fra InOffice



Figur E-1 Kraftmålinger på strekningen Kongsvinger - Grensen ved km123,8-124,2. (2007)

Tabell E-0-1: Middelerdi og standardavvik for Kongsvinger - Grensen

Parametere	Enhet	Hele strekningen	1 km ⁺	200 m [*]	60 m [°]
Middel verdi, F_{mid}	[N]	68,248	69,0	68,69	71,89
Maks. verdi, F_{maks}	[N]	145,44	85,17	85,17	84,27
Min. verdi, F_{min}	[N]	18,670	52,090	52,09	60,64
Standard avvik, S	[N]	11,191	4,579	5,559	4,076
$F_m - (3 \cdot S)$	[N]	34,675	55,264	52,015	59,65
$F_m + (3 \cdot S)$	[N]	101,821	82,736	85,37	84,10
Gaussfordeling 25-50 N	[%]		0	0	0
Gaussfordeling 50-75 N	[%]		93,147	89,877	87,023
Gaussfordeling 75-100 N	[%]		6,853	10,123	12,977

+ 1 km = 123,54– 124,54 km.

* 200 m = km. 123,9 – 124,1

° 60 m = km. 124,1 – 124,16

Appendiks F

Kildekoden til simulering av strømvtageren i Matlab (m-filen)

%Masteroppgave - Matematisk modellering av strømvtageren WBL 88

%*****

%Dette programmet beregner egenverdiene til tilstandslikningen

%Konstanter til stromavtageren

%*****

hk0=0; %Kontaktledningens utgangsposisjon ved t=0 og ved

utligger

dhk=-0.03; %Høydeforandringen til kontaktledningen bortenfor

utligger (kl har litt nedheng)

hus=0.015; %Stasjonær utgangsposisjon for masse 2(midt i

bevegelsesrommet på 3 cm)

k1=1000000; %Friksjonselementenes fjærkonstant [N/m]

k2=4400; %Fjærkonstant for masse 2 [N/m]

k3=1000000; %Friksjonskonstant for stopphøyde [N/m]

k4=100000; %Friksjonskonstant for stopphøyde [N/m]

d1=63.5; %Dempningsfaktorene til masse 1 [Ns/m]

d2=75.6; %Dempningsfaktorene til masse 2 [Ns/m]

m1=19.7; %Massen til saksemassen (masse 1) [kg]

m2=6.6; %Massen til toppstykket (masse 2) [kg]

m3=50; %Massen til kontaktledningen (masse 3) [kg] Antatt

f3=0; %Kraften fra ku og oppover, ved stasjonært tilstand er

fu=0 [N] eller [kg m/s2]

%Finner egenverdiene til tilstandslikningen A

%*****

%Tilstandslikningen A er differensiallikningen til stromavtageren

p=0

if (p==1)

%Egenverdiene uten kontaktledning

A=[0 0 1 0;0 0 0 1;-(k2+k1)/m1 k2/m1 -(d1+d2)/m1 d2/sml;k2/m2 -(k2+k4)/m2 d2/m2 -d2/m2]

%A=[0 0 1 0;0 0 0 1;-(k2+k1)/m1 k2/m1 -(d1+d2)/m1 d2/ml;k2/m2 -(k2)/m2 d2/m2 -d2/m2]

elseif (p==0)

%Egenverdiene med kontaktledning

A=[0 0 0 1 0 0;0 0 0 0 1 0;0 0 0 0 0 1;-(k2+k1)/m1 k2/m1 0 -(d1+d2)/m1 d2/ml 0;k2/m2 -(k2+k4)/m2 k4/m2 d2/m2 -d2/m2 0;0 k4/m3 -k4/m3 0 0 0]

end

E=eig(A)

plot(E,'o')

grid on;

title('Egenverdiene til den 6 koblede differensiallikningen');

h=legend('Egenverdiene');

```

%Masteroppgave - Matematisk modellering av strømvatageren WBL 88
%*****
%Simulering uten kontaktledning - 4 koblete differensiallikninger
%*****
dx0=[0 0.01 0 0];
options = odeset('RelTol',1e-2,'AbsTol',[1e-4 1e-4 1e-5 1e-5]);
%Tidsintervallet til integrasjonen=2 sek
%og initialverdiene til X ved t=0
[T,dX] = ode23(@DIFFTO,[0 2],dx0,options);

%De nye verdiene for høyde og fart
%*****
dx1=dX(:,1);           %Høydeforandringen til masse 1 i [m]
dx2=dX(:,2);           %Høydeforandringen til masse 2 i [m]
Ddx1=dX(:,3);          %Hastighetsforandringen til masse 1 i [m/s]
Ddx2=dX(:,4);          %Hastighetsforandringen til masse 2 i [m/s]

%Beregner kreftene
%*****
k4=100000;             %Friksjonskonstant for stopphøyde [N/m]
f1=17;

p=1;                   %Boolskt uttrykk
if (p==0)

%Beregner og plotter kraften på masse 1 (f1)
%*****
i=1;
for n=length(Ddx1) %n er lengden på vektoren til Ddx1
while i <= n
    if (Ddx1(i)>0) %Dersom hastigheten er positiv oppover vil kraften
        f11(i)=-f1; %f1 virke i motsatt retning
    elseif (Ddx1(i)==0)
        f11(i)=0;
    elseif (Ddx1(i)<0)
        f11(i)=f1;
    end
    i=i+1;
end
end

plot(T,f11,'r')
title('Friksjonskraften til saksemassen (masse 1)');
xlabel('tid [s]'); ylabel('Kraftendring [N]');

elseif (p==1)

%Plotter bevegelsen til masse 1
%*****
figure;
plot(T,dx1,'r')
title('Høydeforandringen til saksearmen (masse 1)');
xlabel('tid [s]'); ylabel('Høyden X1 [m]');
h=legend('Initial X0=[X01 X02 V01 V02]=[0 0.01 0 0]',2);
view(2);
axis tight;
grid on;

%Plotter bevegelsen til masse 2
%*****
figure
plot(T,dx2,'b')
title('Høydeforandringen til toppstykket (masse 2)');
xlabel('tid [s]'); ylabel('Høyden X2 [m]');
h=legend('Initial X0=[X01 X02 V01 V02]=[0 0.01 0 0]',2);
view(2);

```

```

axis tight;
grid on;

%Plotter hastigheten til masse 1
%*****
figure;
plot(T,DdX1,'r')
title('Hastighetsforandringen til saksearmen (masse 1)');
xlabel('tid [s]'); ylabel('Hastighet V1 [m/s]');
h=legend('Initial X0=[X01 X02 V01 V02]=[0 0.01 0 0]',2);
view(2);
axis tight;
grid on;

%Plotter hastigheten til masse 2
%*****
figure;
plot(T,DdX2,'b')
title('Hastighetsforandringen til toppstykket (masse 2)');
xlabel('tid [s]'); ylabel('Hastighet V2 [m/s]');
h=legend('Initial X0=[X01 X02 V01 V02]=[0 0.01 0 0]',2);
view(2);
axis tight;
grid on;

end;

hold off
drawnow

```

```

%Masteroppgave - Matematisk modellering av strømvtageren WBL 88
%*****
%Simulering uten kontaktledning - 4 koblete differensiallikninger
%*****
function Ddx = DIFFTO(t,dx) %dx(1), dx(2) er i [m], dx(3) og dx(4) er i [m/s]
Ddx=zeros(4,1); %En kolonnevektor for hastighet og akselerasjon til massene.
f3=0; %Initialkraften til toppstykket i stasjonær tilstand

%Konstanter til strømvtageren
%*****
%hus=0.015; %Stasjonær utgangsposisjon for masse 2(midt i bevegelsesrommet på 3 cm)
k1=1000000; %Friksjonselementenes fjærkonstant [N/m]
k2=4400; %Fjærkonstant for masse 2 [N/m]
k3=1000000; %Friksjonskonstant for stopphøyde [N/m]
k4=100000; %Friksjonskonstant for stopphøyde [N/m]
d1=63.5; %Dempningsfaktorene til masse 1 [Ns/m]
d2=75.6; %Dempningsfaktorene til masse 2 [Ns/m]
m1=19.7; %Massen til saksemassen (masse 1) [kg]
m2=6.6; %Massen til toppstykket (masse 2) [kg]
m3=50; %Massen til kontaktledningen (masse 3)simuleres her med 50 kg
f1=17; %Friksjonskraften til masse 1

%Ulineær kraft mellom masse 1 og 2 (k3)
%*****
dx5=dx(2)-dx(1); %Avviket mellom bevegelsen til masse 1 og 2
if (dx5>=0.015) % (utgangsposisjon=0.015m)
    f3=k3*(dx5-0.015); %Tiltrekkende kraft mellom masse 1 og 2
elseif (dx5>-0.015)&(dx5<0.015) % (kraften virker nedover og vil være negativ)
    f3=0; %Fjærkraften mellom masse 1 og 2
elseif (dx5<=-0.015)
    f3=k3*(dx(2)-dx(1)); %Frastøtende kraft mellom masse 1 og 2
end; % (kraften virker oppover og vil være positiv)

if (Ddx(1)>0)
    f11=-f1;
elseif (Ddx(1)==0)
    f11=0;
elseif (Ddx(1)<0)
    f11=f1;
end;

%Differensiallikningene (4-koblet)
%*****
%Hastigheten (v1) til masse 1 benevning [m/s]
Ddx(1)=dx(3);
%Hastigheten (v2) til masse 2 benevning [m/s]
Ddx(2)=dx(4);
Ddx(3)=(-(k2+k1)*dx(1)+(k2)*dx(2)-(d1+d2)*dx(3)+d2*dx(4)+f11+f3)/m1;
%Akselerasjonen (a1) til masse 1 [m/s2] (lagt til k3 i ledd 2)
Ddx(4)=(k2*(dx(1)-dx(2))+d2*(dx(3)-dx(4))-f3)/m2;
%Akselerasjonen (a2) til masse 2 [m/s2]

```

```

%Masteroppgave - Matematisk modellering av strømvatageren WBL 88
%*****
%Simulering med kontaktledning - 6 koblete differensiallikninger
%*****
dx0=[0 0.01 0 0 0 0];
options = odeset('RelTol',1e-2,'AbsTol',[1e-4 1e-4 1e-4 1e-5 1e-5 1e-5]);
%Tidsintervallet til integrasjonen=2 sek og initialverdiene til X ved t1=0
[T,dx] = ode23(@DIFFTRE,[0 4],dx0,options);

%De nye verdiene for høyde og fart
%*****
dx1=dx(:,1); %Høydeforandringen til masse 1 i [m]
dx2=dx(:,2); %Høydeforandringen til masse 2 i [m]
dx3=dx(:,3); %Høydeforandringen til masse 3 i [m]
Ddx1=dx(:,4); %Hastighetsforandringen til masse 1 i [m/s]
Ddx2=dx(:,5); %Hastighetsforandringen til masse 2 i [m/s]
Ddx3=dx(:,6); %Hastighetsforandringen til masse 3 i [m/s]

%S\Ddx=[dx1 dx2 Ddx1 Ddx2];

%Beregner kreftene
%*****
k4=100000; %Friksjonskonstant for stopphøyde [N/m]
f1=17; %Konstant friksjonskraft som virker på masse 1

p=1; %Boolskt uttrykk
if (p==0)

%Beregner kontaktkraften fra kjøreledningen (f4)
%*****
f4=-k4*(dx3-dx2); %Kontaktkraften toppstykket og kontaktledningen

figure;
plot(T,f4,'r')
title('Kontaktkraften mellom kontaktledningen (masse 3) og toppstykket (masse 2)');
xlabel('tid [s]'); ylabel('Kraftforandring [N]');

%Beregner kraften på masse 1 (f1)
%*****
i=1;
for n=length(Ddx1) %n er lengden på vektoren til Ddx1
while i <= n
if (Ddx1(i)>0) %Dersom hastigheten er positiv oppover vil kraften f1
f11(i)=-f1; %virke i motsatt retning
f11(i)=-f1;
elseif (Ddx1(i)==0)
f11(i)=0;
elseif (Ddx1(i)<0)
f11(i)=f1;
end
i=i+1;
end
end

figure;
plot(T,f11,'r')
title('Kraften på saksemassen (masse 1)');
xlabel('tid [s]'); ylabel('Kraftendring [N]');

elseif (p==1)

%Plotter bevegelsen til masse 1
%*****
figure;
plot(T,dx1,'r')
title('Høydeforandringen til saksemassen (masse 1)');

```

```

xlabel('tid [s]'); ylabel('Høyde X1 [m]');
h=legend('Initial X0=[X01 X02 X03 V01 V02 V03]=[0 0.01 0 0 0 0]',2);
view(2);
axis tight;
grid on;

%Plotter bevegelsen til masse 2
%*****
figure
plot(T,dX2,'b')
title('Høydeforandringen til toppstykket (masse 2)');
xlabel('tid [s]'); ylabel('Høyde X2 [m]');
h=legend('Initial X0=[X01 X02 X03 V01 V02 V03]=[0 0.01 0 0 0 0]',2);
view(2);
axis tight;
grid on;

%Plotter bevegelsen til masse 3
%*****
figure
plot(T,dX3,'b')
title('Høydeforandringen til kontaktledningen (masse 3)');
xlabel('tid [s]'); ylabel('Høyde X3 [m]');
h=legend('Initial X0=[X01 X02 X03 V01 V02 V03]=[0 0.01 0 0 0 0]',2);
view(2);
axis tight;
grid on;

%Plotter hastigheten til masse 1
%*****
figure;
plot(T,DdX1,'r')
title('Hastighetsforandringen til saksemassen (masse 1)');
xlabel('tid [s]'); ylabel('Hastighet V2 [m/s]');
h=legend('Initial X0=[X01 X02 X03 V01 V02 V03]=[0 0.01 0 0 0 0]',2);
view(2);
axis tight;
grid on;

%Plotter hastigheten til masse 2
%*****
figure;
plot(T,DdX2,'b')
title('Hastighetsforandringen til toppstykket (masse 2)');
xlabel('tid [s]'); ylabel('Hastighet V2 [m/s]');
h=legend('Initial X0=[X01 X02 X03 V01 V02 V03]=[0 0.01 0 0 0 0]',2);
view(2);
axis tight;
grid on;

%Plotter hastigheten til masse 2
%*****
figure;
plot(T,DdX3,'b')
title('Hastighetsforandringen til kontaktledningen (masse 3)');
xlabel('tid [s]'); ylabel('Hastighet V3 [m/s]');
h=legend('Initial X0=[X01 X02 X03 V01 V02 V03]=[0 0.01 0 0 0 0]',2);
view(2);
axis tight;
grid on;

end;

hold off
drawnow

```



```

%Masteroppgave - Matematisk modellering av strømvatageren WBL 88
%*****
%Simulering med kontaktledning - 6 koblete differensiallikninger
%*****
function Ddx = DIFFTRE(t,dx)
%dx(1), dx(2) og dx(3) er i [m], dx(4), dx(5) og dx(6) er i [m/s]
%En kolonnevektor for hastighet og akselerasjon til masse 1 og 2.
Ddx=zeros(6,1);
f3=0;           %Initialkraften til toppstykket i stasjonær tilstand

%Konstanter til stromavtageren
%*****
%hus=0.015;    %Stasjonær utgangsposisjon for masse 2(total bevegelse på 3 cm)
k1=1000000;    %Friksjonselementenes fjærkonstant [N/m]
k2=4400;       %Fjærkonstant for masse 2 [N/m]
k3=1000000;    %Friksjonskonstant for stopphøyde [N/m]
k4=100000;     %Friksjonskonstant for stopphøyde [N/m]
d1=63.5;       %Dempningsfaktorene til masse 1 [Ns/m]
d2=75.6;       %Dempningsfaktorene til masse 2 [Ns/m]
m1=19.7;       %Massen til saksemassen (masse 1) [kg]
m2=6.6;        %Massen til toppstykket (masse 2) [kg]
m3=50;         %Massen til kontaktledningen (masse 3)simuleres her med 50 kg
f1=17;         %Friksjonskraften på saksemassen (masse 1)

%Ulineær kraft mellom masse 1 og 2 (k3)
%*****
dx5=dx(2)-dx(1); %Avviket mellom bevegelsen til masse 1 og 2
if (dx5>=0.015)
    f3=k3*(dx5-0.015);           %Tiltrekkende kraft mellom masse 1 og 2
elseif (dx5>-0.015)&(dx5<0.015) % (kraften virker nedover og vil være negativ)
    f3=0;                       %Fjærkraften mellom masse 1 og 2
elseif (dx5<=-0.015)
    f3=k3*(dx(2)-dx(1)); %Frastøtende kraft mellom masse 1 og 2
end;                            % (kraften virker oppover og vil være positiv)

if (Ddx(1)>0)
    f11=-f1;
elseif (Ddx(1)==0)
    f11=0;
elseif (Ddx(1)<0)
    f11=f1;
end;

%Kraft fra kontaktledning
%*****
f4=k4*(Ddx(3)-Ddx(2)); %Kraft fra kontaktledningen rettet nedover

%Differensiallikningene
%*****
%Hastigheten (v1) til masse 1 benevning [m/s]
Ddx(1)=dx(4);
%Hastigheten (v2) til masse 2 benevning [m/s]
Ddx(2)=dx(5);
%Hastigheten (v3) til masse 3
Ddx(3)=dx(6);
%Akselerasjonen (a1) til masse 1 [m/s2]
Ddx(4)=(-(k2+k1)*dx(1)+(k2)*dx(2)-(d1+d2)*dx(4)+d2*dx(5)+f11+f3)/m1;
%Akselerasjonen (a2) til masse 2 [m/s2]
Ddx(5)=(k2*dx(1)-(k2+k4)*dx(2)+k4*dx(3)+d2*(dx(4)-dx(5))-f3)/m2;
%Akselerasjonen (a3) til masse 3 [m/s2]
Ddx(6)=-k4*(dx(3)-dx(2))/m3;

```

```

%Masteroppgave - Matematisk modellering av strømvatageren WBL 88
%*****
%COMSOL SCRIPT - Animasjon av simuleringer gjort i COMSOL
%*****
%% 1. Import the fem-struct from COMSOL Multiphysics as fem
% (file menu in COMSOL Multiphysics):
%flload('Strømvatageren_1.mph')
%flload('Med sikksakk 1 stravt_90.mph')
flload('Med_sikksakk_2 stravt_130_a30.mph')
% Number of solutions in model:
num_of_solutions = length(fem.sol.tlist);

%% 2. Edit the following fields in the script and run:
% a) lindlim, this is the data range, between min and max. If the
% minimum value over the entire solution time is min and the maximum
% value over the entire solution time is max, set lindlim = [min max]
%
% b) Experiment with plot by using the postplot-command, eg.:
% m = postplot(fem, ...
% 'solnum',num_of_solutions, ...
% 'lindata',{'w','cont','on','unit','m'}, ...
%
% c) Play with the axis limits to fit the deformation within the plot
%
% d) Adjust title and labels.
%
% e) When you are satisfied with the plot, exchange the command postplot
% below with the command postmovie, lower the 'camva' value to eg. 5
% update the 'solnum' property to 1:num_of_solutions to animate every
% solution in the model, eg.:
% m = postmovie(fem, ...
% 'solnum',1:num_of_solutions, ...
% 'lindata',{'w','cont','on','unit','m'}, ...
%

%campos([97.5003 1.7e+003 92.6399])
%campos([88.8435 1.8e+003 245.9712]) bra
campos([97.5 1.7e+003 74.0148])
%camtarget([97.5003 -29.4931 92.6399])
%camtarget([91.51 -89.5572 74.8731]) bra
camtarget([97.5 -23.0263 74.0148])
%[X,Z] = meshgrid(0:195,0:1.6); %test

m = postmovie(fem, ...
'solnum',1:num_of_solutions, ...
'lindata',{'w','cont','on','unit','m'}, ... %w=(flc2hs(x-V0*t,dx)-flc2hs(x-
(V0*t+dX),dx))
'linmap','jet(1024)', ... %cool
'lindlim',[-0.11 0.061], ... % Data value range, eg. [-0.11 0.061], depends on
solution
'deformedg',{'u','0','w'}, ...
'deformscale',2, ... % Displayed displacement is multiplied with this factor
'refine',4, ... % "Smoothing" of plot mellom 1 og 2
'maxminedg', {'flc2hs(x-30-V0*t,dx)-flc2hs(x-30-(V0*t+dX),dx)','unit','m'}, ...
'axisequal','off', ...
'grid','on', ... % Display grid in animation
'axis',[-10 205 -0.1 0.1 -0.1 1.7],... % Axe limits [xmin xmax ymin ymax zmin zmax]
'campos',[76.2082 1.7e+003 82.9917],... % Position of camera [x,y,z]
'camtarget',[76.2082 -23.0263 82.9882],... % Camera aiming point [x,y,z]
'camup',[0 0 1],... % Camera up vector [x,y,z]
'camva',8.0827,... % "Zoom", try between 1-10 (2.5)
'title','Kraftbeltet mellom stromavtager og kontaktledning ved 130 km/h fra t=0 til
t=10 sek',...
'Axislabel',{'Strekning [m]','Sikksakk [m]','Opploft [m]'},...
'linewidth',1.5,...
'Filename','Med_sikksakk_2 stravt_130_a30',...

```

```
'fps',10,...           % Frames per second in animation, default 12
'Aviquality',75,...    % Avi gaulity, default 75 (%)
'height',480*1.5,...   % Default 480
'width',640*1.5,...    % Deafult 640
'repeat',1);
```

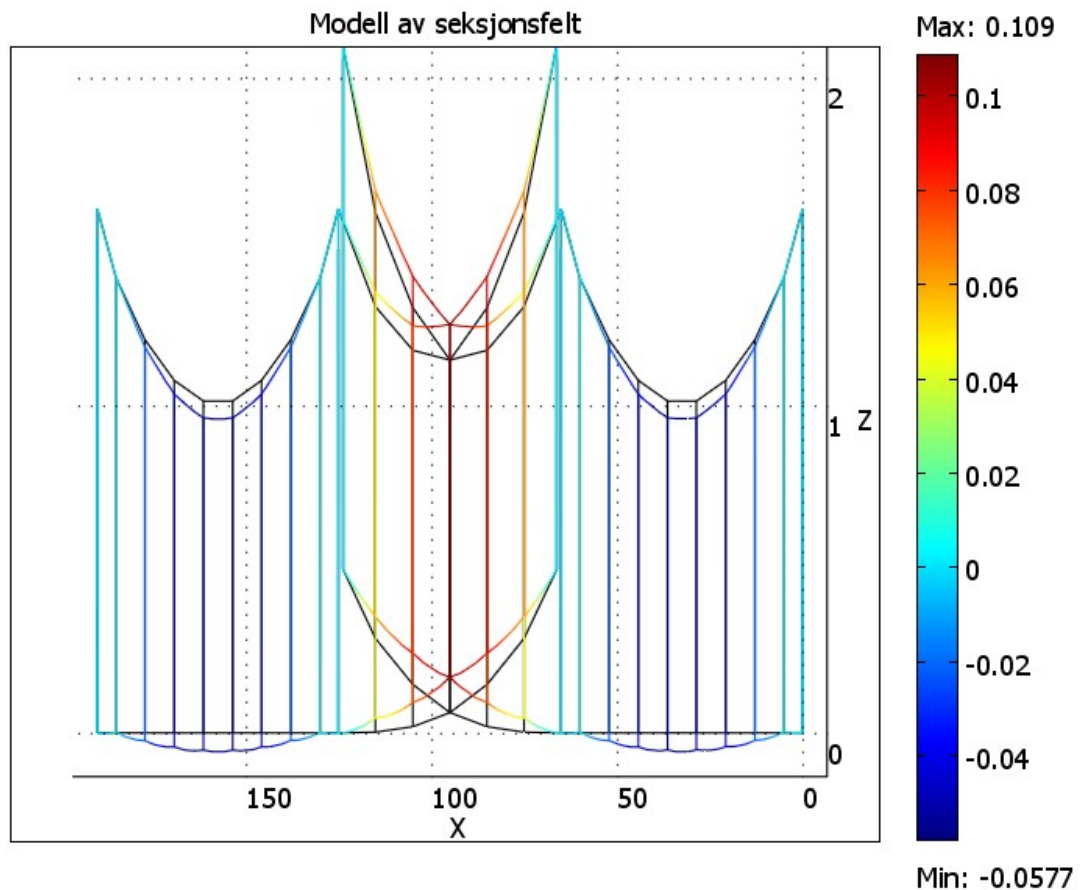
Appendiks G

Forslag til modellering av parallellfelt

Nedenfor følger en beskrivelse av et modellert parallellfelt.

Parallellfelt er en fellesbetegnelse for seksjonsfelt og vekslingsfelt. Dette er en spennlengde med 2 parallelle kontakttråder. Et parallellfelt er enten bygd opp som et vekslingsfelt med mekanisk skille eller som et seksjonsfelt med elektrisk skille.

En parallellfelt er et vekslingsfelt (bestående av en spennlengde) hvor to møtende kontaktledningsparter er ført parallelt før de avspennes. Dette er to seksjoner elektrisk isolert fra hverandre. Se figuren nedenfor for skisse av et seksjonsfelt.



Denne modellen består av tre spenn hvorav et spenn viser overgangen fra kontakttråd 1 til kontakttråd 2. Modellen er forenklet i forhold til reelt system. For beregning av kontakttrådens høydeforløp $y(x)$ i seksjonsfeltet, se appendiks A. I disse beregningene er den kjørbare kontakttrådens høyde ved utligger $FH=550$.

- Kontakttrådhøyde ved utligger 1: $FH_1=550$
- Kontakttrådhøyde ved utligger 2: $FH_2=550$
- Kontakttrådens høydeforskjell: $FH=\Delta FH_2-FH_1=0$
- $y(x)$ = verdien taes ut av tabellen som finnes i appendiks A.
- x = avstand fra den kjørbare utligger
- a = spennlengde

Ligningen for kontakttrådens høydeforløp er som følger:

$$FH(x) = FH + \Delta FH / a * x + y(x)$$

Avstanden mellom kontaktledningene i et seksjonsfelt skal være 0.45 m (y-retning). Under sterke vindforhold kan kontaktledningene komme i svingninger sideveis slik at de kommer i kontakt med hverandre. Med denne avstanden unngås dette. Videre er det 1.2 m (i x-retning) mellom utliggerne i seksjonsfeltet. I seksjonsfeltet er det en spennlengde på 60 m samt et oppløft på 0.5 m (i z-retning) i enden av hver kontaktledning. I vekslingspunktet skal det være 6 cm oppløft.

Appendiks H

Innhold på DVD

1. Bilder av strømvogteren WBL 88 på målevogteren
2. Veiledning
3. COMSOL modeller og animasjons-fil

Vedlagt DVD inneholder følgende modeller:

Modell med en strømvogter

- En strømvogter 100 km_h
- En strømvogter 130 km_h
- En strømvogter 160 km_h

Modell med to strømvogtere og avstand lik 30 og 65 meter

- To strømvogtere 100 km_h a_30
- To strømvogtere 130 km_h a_30
- To strømvogtere 160 km_h a_30
- To strømvogtere 100 km_h a_65
- To strømvogtere 130 km_h a_65
- To strømvogtere 160 km_h a_65

Modell med seksjonsfelt

4. Videoopptak
5. Rapport